

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# МЕТОДИ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ ВІД КОРОЗІЇ ТА ЗАХИСТ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

*Затверджено Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як підручник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 161 «Хімічні технології»,  
спеціалізацією «Електрохімічні технології  
неорганічних та органічних матеріалів»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2018

Рецензенти: *Ю. К. Пірський*, д-р хім. наук, ст. наук. сп., завідувач лабораторії матеріалів електрохімічної енергетики Інститут загальної та неорганічної хімії НАНУ ім. В. І. Вернадського  
*В. З. Барсуков* д-р. хім. наук, проф., завідувач кафедри електрохімічної енергетики та хімії, Київський національний університет технологій та дизайну  
*О. В. Лінючева*, д-р. техн. наук, проф., завідувач кафедри Технології електрохімічних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор

*Гриф надано Вченою радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 7 від 25.06.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Укладачі: *Бик Михайло Володимирович*, канд. хім. наук, доц.  
*Букет Олександр Іванович*, канд. техн. наук, доц.  
*Васильєв Георгій Степанович*, канд. техн. наук, ас.

# МЕТОДИ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ ВІД КОРОЗІЇ ТА ЗАХИСТ НА СТАДІЇ ПРОЕКТУВАННЯ

Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування [Електронний ресурс] : підр. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології», спеціалізації «Електрохімічні технології неорганічних та органічних матеріалів» / М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв – Електронні текстові дані (1 файл: 8,81 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 318 с.

Узагальнено знання із різних методів протикорозійного захисту і визначення оптимальних рішень для захисту об'єктів різних галузей (хімічної, енергетичної, комунального господарства) від корозії. Викладання дисципліни базується на знаннях та навичках, які були надбані при вивченні дисциплін: "Теоретична електрохімія", "Корозія металів", "Металознавство" та інші. Ця дисципліна завершує підготовку фахівців у цій галузі і необхідний як для спеціалістів-корозіоністів, які будуть працювати в промисловості, так і для корозіоністів, які будуть працювати у проектних групах.

©М. В. Бик, О. І. Букет, Г. С. Васильєв, 2018

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. ЗАВДАННЯ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ .....	9
1.1. Основні визначення і види корозійних процесів .....	10
1.2. Електрохімічна корозія.....	13
1.3. Механізм електрохімічної корозії.....	14
1.4. Фактори, що впливають на швидкість корозії .....	20
1.5.Методи захисту металів від корозії: .....	30
РОЗДІЛ 2. КОРОЗІЙНИЙ МОНІТОРИНГ.....	33
2.1. Мета та завдання корозійного моніторингу .....	33
2.2. Методи та прилади корозійного моніторингу.....	33
2.2.1. Контроль на основі параметрів середовища .....	33
2.2.2. Резистивний метод.....	34
2.2.3. Метод поляризаційного опору .....	38
РОЗДІЛ 3. АКТИВНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ ВІД КОРОЗІЇ.....	44
3.1. Катодний захист металів. ....	44
3.1.1. Потенціал повного катодного захисту сталі.....	46
3.1.2. Критерій повного катодного захисту.....	50
3.1.3. Мідно–сульфатний електрод порівняння .....	51
3.1.4. Практичні критерії катодного захисту.....	52
3.1.5. Максимальний потенціал захисту.....	55
3.1.6. Оцінювання ефективності катодного захисту металів .....	56
3.1.7. Устаткування для катодного захисту.....	58

3.1.7.1. Станції катодного захисту .....	58
3.1.7.2. Катодна станція нескінченної довжини .....	59
3.1.7.3. Катодна станція кінцевої довжини .....	61
3.1.7.4. Анодне заземлення .....	64
3.1.8. Контроль за роботою та обслуговування катодних станцій .....	69
3.2. Протекторний захист металів від корозії .....	70
3.2.1. Матеріали для систем протекторного захисту .....	75
3.2.2. Переваги і недоліки протекторного захисту .....	78
3.2.3. Технічні засоби протекторного захисту .....	79
3.3. Електрокорозія .....	91
3.3.1. Джерела блукаючих струмів .....	91
3.3.2. Вплив блукаючих струмів на підземні споруди .....	97
3.3.3. Методи визначення присутності блукаючих струмів в ґрунті .....	98
3.3.3.1. Вимірювання потенціалу ґрунту і підземної споруди .....	98
3.3.3.2. Вимірювання електричного поля в ґрунті .....	100
3.3.4. Розподіл блукаючих струмів за різних умов .....	102
3.3.5. Технічні засоби захисту від блукаючих струмів .....	104
3.3.5.1. Установки для електродренажу .....	108
3.4. Анодний захист .....	115
3.4.1. Технічні засоби анодного захисту .....	122
3.4.1.2. Промислові електроди порівняння .....	126
3.4.1.3. Промислові регулятори потенціалу .....	128
3.4.2. Промислове використання анодного захисту .....	129
4. ПАСИВНИЙ ЗАХИСТ МЕТАЛІВ .....	131

4.1. Неорганічні покриття .....	132
4.1.1. Силікатні емалі.....	132
4.1.2. Покриття портланд–цементом .....	133
4.1.3. Покриття, отримані хімічною обробкою металу .....	134
4.1.4. Оксидні покриття.....	136
4.2. Органічні покриття .....	137
4.2.1. Фарби.....	137
4.2.1.1. Нанесення лакофарбових покриттів .....	137
4.2.1.2. Травильна ґрунтовка.....	139
4.2.2. Вінілові смоли.....	139
4.2.3. Епоксидні смоли .....	140
4.2.4. Облицювання пластмасами.....	141
4.3. Захист заліза від корозії покриттями з інших металів.....	142
<b>РОЗДІЛ 5. КОМБІНОВАНИЙ ЗАХИСТ МЕТАЛІВ .....</b>	<b>145</b>
5.1. Комбіновані покриття.....	145
5.2. Основні положення системного підходу при реалізації заходів з комплексного захисту.....	153
<b>РОЗДІЛ 6. ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ .....</b>	<b>157</b>
6.1. Використання металів при конструюванні.....	157
6.1.1. Маркування сплавів.....	157
6.2. Леговані сталі та сплави, сфери їх застосування .....	161
6.2.1. Сталі мартенситно–феритного і мартенситного класу.....	161
6.2.2. Сталі аустенітного класу .....	162
6.2.3. Аустенітно–феритні сталі.....	163

6.2.4. Сплави на залізо–нікелевій основі.....	164
6.2.5. Сплави на нікелевій основі.....	164
6.3. Сумісність матеріалів у конструкціях .....	165
6.3.1. Загальні рекомендації з поєднання різнорідних матеріалів .....	168
РОЗДІЛ 7. ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОЦЕС	
КОРОЗІЇ.....	172
7.1. Корозія під напруженням (корозійне розтріскування) .....	174
7.2. Водневе руйнування .....	178
7.3. Корозійна втомлюваність .....	179
7.4. Кавітаційна корозія.....	181
7.5. Фретінг–корозія .....	182
7.6. Загальні рекомендації по зменшенню впливу механічних напружень на корозійні процеси .....	184
7.7. Вплив механічних факторів на корозію трубопроводів .....	189
РОЗДІЛ 8. ХАРАКТЕРИСТИКА КОРОЗІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ.....	
8.1. Атмосфера як корозійне середовище.....	190
8.1.1. Фактори, що впливають на швидкість атмосферної корозії.....	193
8.1.2. Захист металів від корозії в атмосфері .....	198
8.2. Ґрунт як корозійне середовище.....	201
8.2.1. Агресивність ґрунту.....	207
8.3. Природні води як корозійне середовище .....	209
8.3.1. Основні фактори, що визначають корозійну активність води.....	216
8.3.2. Захист металів від корозії у природних водах .....	221
8.4. Біокорозія та біопошкодження.....	225

8.4.1. Види біологічної корозії.....	225
8.4.2. Класифікація біопшкоджень .....	226
РОЗДІЛ 9. АНТИКОРОЗІЙНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ .....	231
9.1. Рекомендації з антикорозійного обслуговування .....	231
9.2. Антикорозійне обслуговування споруд та обладнання .....	233
9.3. Попередження корозії та захист від неї.....	238
РОЗДІЛ 10 ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИКОРОЗІЙНИХ ЗАХОДІВ.....	241
10.1. Оцінка економічної ефективності антикорозійних заходів при проектуванні .....	241
10.2. Рекомендації з оцінки економічної ефективності антикорозійних заходів .....	242
10.3. Методи оцінки економічної ефективності антикорозійних заходів .....	249
РОЗДІЛ 11. РОЗРАХУНОК КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ТРУБОПРОВОДІВ .....	251
11.1. Початкові дані.....	251
11.2. Розрахункові залежності для розподілення прикладеної різниці потенціалів і струму захисту вздовж трубопроводу.....	260
11.3. Розрахунок і оптимізація параметрів установок катодного захисту .....	269
11.4. Методи збільшення зони захисту катодних установок .....	294
11.5. Спільний катодний захист підземних металевих споруд .....	305
Перелік контрольних питань з дисципліни «Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування».....	310
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ .....	312

## ВСТУП

Завдання захисту від корозії основного виробничого обладнання й до сьогодні лишається однією з найбільш актуальних з погляду забезпечення безпеки як на виробництві, так і навколишнього середовища в цілому. Проблема протикорозійного захисту полягає у тому, що сучасна промисловість базується на використанні обладнання, виготовленого в переважно зі сталей та сплавів на основі заліза, незважаючи на значне поширення композиційних, полімерних та інших неметалевих матеріалів з високим хімічним опором. Навіть для сплавів підвищеної корозійної стійкості існує корозійна небезпека у будь-якому природному (повітря, природні водойми, природні ґрунти) чи технологічному середовищах. Тому розробка, експлуатація і обслуговування активних систем і пасивних заходів захисту від корозії вимагає регулярного заповнення численних робочих місць спеціалістами відповідної кваліфікації.

Даний підручник призначений для ознайомлення студентів спеціальності «Хімічні технології та інженерія», які спеціалізуються на електрохімічних технологіях, з особливостями корозії основного виробничого обладнання в усіх можливих середовищах, надання цим студентам поняття про найбільш поширені активні й пасивні методи захисту технологічного обладнання від корозії (за виключенням гальванічних та інших способів нанесення металічних покриттів), а також має сприяти набуттю студентами досвіду з вибору протикорозійного захисту, адекватного заданим корозійним умовам, та досвіду розрахунку спеціалізованого обладнання для активного протикорозійного захисту й основних його конструкційних елементів. Окремо увагу



придiлено методам монiторингу корозiйної безпеки металевого обладнання та основним пiдходам щодо захисту обладнання на стадiї проектування.

## РОЗДІЛ 1. ЗАВДАННЯ ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ

Корозія металів завдає значної шкоди всім галузям господарства. Ця шкода визначається не стільки вартістю металу, що кородує, скільки витратами на захист від корозії, вартістю ремонтних робіт, а також збитками за рахунок тимчасового припинення нормального функціонування ушкодженого корозією обладнання.

Актуальність питань захисту від корозії підземних металевих споруд зв'язку з року в рік не зменшується, а навпаки, зростає. Це пояснюється тим, що основне технологічне обладнання вже відпрацювало свій амортизаційний термін (близько 30 років), але продовжує експлуатуватися по факту його працездатності.

З метою забезпечення своєчасного та надійного захисту підземних металевих конструкцій та комунікацій (наявних і тих, що споруджуються) від корозії необхідно [1]:

- більше уваги приділяти проведенню досліджень з оцінки небезпеки корозії і захисту від неї підземних металевих споруд;
- підвищувати якість виконання проектних робіт;
- забезпечувати своєчасне виконання робіт, передбачених проектами щодо протикорозійного захисту;
- підвищувати якість і надійність захисних покривів і покриттів, що наносяться на металеві конструкції;
- поліпшувати обслуговування підземних металевих споруд та встановлених пристроїв захисту;
- забезпечувати об'єкти, що будуються, і експлуатаційні організації необхідними матеріалами, засобами захисту та вимірювальними приладами;
- організувати підготовку кадрів фахівців з питань захисту від корозії.

### 1.1. Основні визначення і види корозійних процесів

Термін «корозія» походить від латинського слова «corrosio» – роз’їдання [1]. Корозія – це процес руйнування металів внаслідок хімічної, електрохімічної або біохімічної взаємодії їх з навколишнім середовищем.

Стандарт Міжнародної організації стандартизації «Корозія металів і сплавів. Термінологія» визначає корозію як фізико–хімічну взаємодію металів з середовищем, у результаті якого змінюються їх властивості. Ця взаємодія веде до часткового або повного руйнування металу. ГОСТ 5272–68 «Корозія металів. Терміни» визначає корозію як руйнування металів внаслідок хімічної і електрохімічної взаємодій їх з корозійним середовищем. Залежно від механізму перебігу корозійного процесу розрізняють хімічну, електрохімічну і біохімічну корозію.

Хімічна корозія металів є взаємодією металу з корозійної середовищем, за якого вважається, що окислення металу і відновлення окисника із корозійного середовища перебігає в одному акті. Прикладом корозії цього типу можна назвати корозію металів у сухих газах і в неелектролітах. Характерною рисою хімічної корозії є утворення продуктів безпосередньо на тій поверхні, яка піддається дії окисника. Корозія цього типу практично не зустрічається на підземних металевих спорудах внаслідок постійної присутності води як окремої фази.

Електрохімічна корозія металів є взаємодією металу з корозійним середовищем – електролітом, за якого іонізація атомів металу і відновлення окисника із корозійного середовища перебігають розділено у просторі, через кілька послідовних стадій, а їх швидкості залежать від електродного потенціалу металу.

Електрохімічна корозія буває таких видів [2]:

- атмосферна у вологому газовому середовищі або у природній атмосфері;

- у рідких провідниках другого роду включаючи водні й неводні розчини електролітів та розплави солей;
- ґрунтова або підземна;
- електрокорозія під дією зовнішнього джерела струму, наприклад, корозія блукаючими струмами.

Біохімічна корозія металів пов'язана з впливом мікроорганізмів, при цьому, метал може зрідка руйнуватися мікроорганізмами безпосередньо, якщо він служить живильним середовищем для них, але найчастіше – під дією продуктів, що утворюються в результаті їх життєдіяльності (рис. 1.1). Останній варіант біохімічної корозії є, по своїй суті, електрохімічною корозією у присутності води й розчинених у ній окисників чи активаторів корозії біогенного походження [2].



Рис. 1.1. Біохімічна корозія

За характером корозійного руйнування розрізняють суцільну, або загальну, і місцеву корозію.

Суцільна корозія (рис. 1.2) охоплює всю поверхню металу, що знаходиться під впливом даної корозійного середовища.

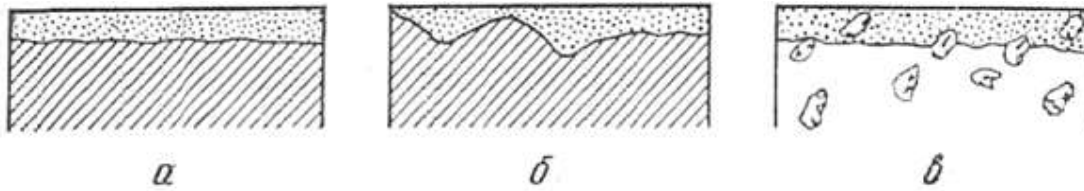


Рис. 1.2. Суцільна корозія: а – рівномірна; б – нерівномірна; в – вибіркова

Суцільна корозія буває рівномірною (рис. 1.2, а), яка перебігає приблизно з однаковою швидкістю по всій поверхні металу, і нерівномірною (рис. 1.2, б) – перебігає з неоднаковою швидкістю на різних ділянках поверхні металу. Структурно-вибіркова корозія (рис. 1.2, в) характеризується руйнуванням однієї структурної складової або одного компоненту сплаву з більшою швидкістю, ніж інші [1].

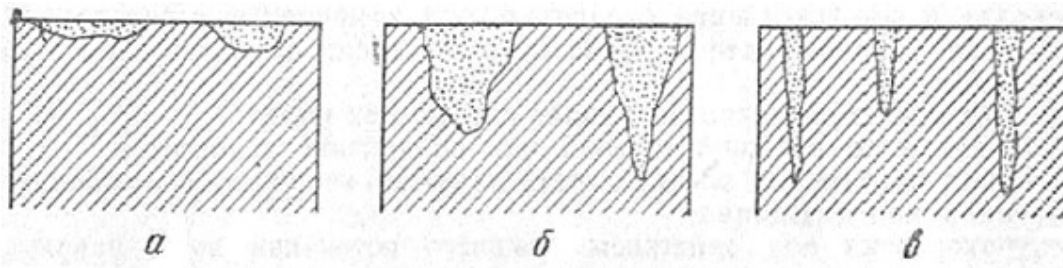


Рис. 1.3. Місцева корозія: а – плямами; б – виразкова; в – точкова

Місцева (локальна) корозія (рис. 1.3) характеризується руйнуванням окремих ділянок поверхні металу, причому, вона буває кількох видів: плямами (рис. 1.3, а – діаметр ураження значно перевищує глибину його проникнення в метал; виразкова (рис. 1.3, б – якій діаметр ураженої ділянки співмірний з глибиною проникнення корозії; точкова (пітінгова) (рис. 1.3, в) – діаметр корозійного пошкодження значно менший від його глибини; Виризняють також корозійне розтріскування, тобто корозію пза умови одночасного впливу корозійного середовища і зовнішніх або внутрішніх механічних напружень з утворенням транскристалітних або міжкристалітних тріщин [1].

## 1.2. Електрохімічна корозія

Електрохімічна корозія металів виникає на межі поділу фаз «метал–електроліт». При зануренні електроду з будь-якого металу в розчин електроліту на межі металу і електроліту виникає ЕРС, яка пов'язана з утворенням подвійного, електричного шару. Електрорушійна сила зазвичай прагне змістити позитивні електричні заряди (іони металу) в напрямку від металу до електроліту. У результаті такого зміщення виникає ЕРС протилежного знака. У той момент, коли вона врівноважує (за абсолютним значенням) першу ЕРС, зміщення припиняється [3].

Необхідною умовою перебігу процесу електрохімічної корозії є можливість спільної дії анодної реакції іонізації металу і катодної реакції відновлення тих чи інших іонів і молекул на поверхні металу. Ця умова реалізується у тому випадку, коли рівноважний анодний потенціал більш негативний, ніж потенціал хоча б однієї з можливих катодних реакцій.

За певної температури і тиску значення ЕРС, що виникає під час утворення подвійного електричного шару, залежить тільки від двох фаз, які знаходяться у контакті – електроліту і металу, з якого зроблений електрод. Метал кородує тоді, коли іон металу переходить з кристалічної ґратки у розчин, а у фазі металу лишаються заряди (у разі двовалентного металу – два електрони). За умови рівноваги корозія припиняється, оскільки дві протилежні ЕРС на електроді врівноважуються й встановлюється динамічна рівновага: на кожен іон, що переходить у розчин, припадає іон, що повертається з розчину до металу.

Електрохімічний потенціал – це потенціал, якого досягає метал в момент встановлення рівноваги, він є кількісним показником більшої або меншої здатності металу переходити в розчин в іонному стані. За умови рівноваги встановлюється рівноважний потенціал, який визначається рівнянням Нернста

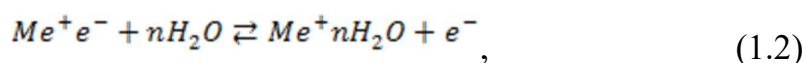
(1.1)

де  $E_0$  – стандартний потенціал певного металу, В;  $R$  – газова постійна рівна 8,341 Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютна температура, К;  $F$  – число Фарадея, рівне 96480 Кл/моль;  $n$  – валентність іонів металу при даній електродної реакції;  $C_{Me} + n$  – концентрація власних іонів металу в розчині, моль / л.

### 1.3. Механізм електрохімічної корозії

Електрохімічна корозія перебігає таким чином, що передача електронів від металу до окиснювача відбувається у гальванічних елементах на поверхні поділу фаз. Причинами появи таких гальванічних елементів можуть бути домішки, що існують в технічних металах, наявність пор в плівках оксидів, контакт двох різних металів, нерівномірна аерація різних ділянок поверхні одного металу і т.д. Під час роботи гальванічного елемента перебігають три процеси (рис. 1.7) [1]:

1. Анодний процес переходу іонів металу в розчин із вивільненням відповідної кількості електронів у фазі металу:



2. Транспорт електронів по металічним фазам від анодних ділянок до катодних та відповідний транспорт іонів у розчині електроліту, що разом являє собою протікання струму в замкненому електричному колі.

3. Катодний процес – це асиміляція надлишкових електронів іонами або молекулами розчину (деполяризатора), здатними до відновлення на катодних ділянках за реакцією



де  $D$  – деполяризатор,  $e$  – електрон.

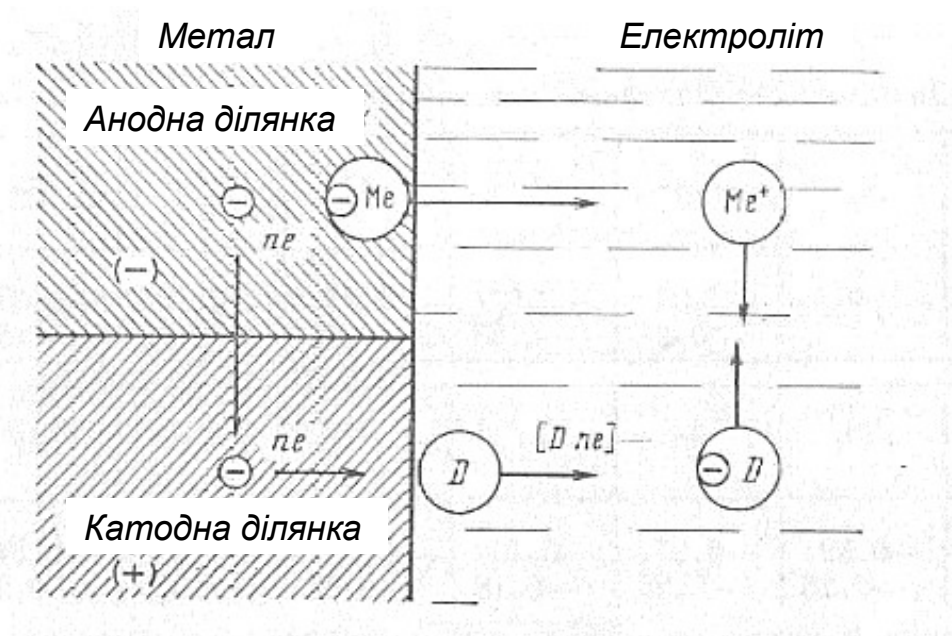


Рис. 1.4. Схема електрохімічного корозійного процесу

Обидва зазначені електродні процеси (анодний і катодний) перебігають спряжено і уповільнення одного з них призводить до гальмування іншого. Як випливає з наведених реакцій, руйнування (корозія) металу зазвичай відбувається на аноді. Отже, електрохімічна корозія на неоднорідній (гетерогенній) поверхні металу аналогічна роботі короткозамкнутого гальванічного елемента [4].

Основними особливостями електрохімічного корозійного процесу є:

- розділення на два спряжені електродні процеси – анодний і катодний;
- залежність кінетики цих спряжених процесів (швидкості корозії) від величини електродного потенціалу – зміщення потенціалу металу в позитивну сторону полегшує анодний процес і ускладнює катодний, а зміщення потенціалу в негативну сторону, навпаки, прискорює катодний процес і гальмує анодний;
- можливість локалізації електродних процесів на різних ділянках поверхні металу, що кородує, де їх перебіг полегшено. При



локалізації електродних процесів розчинення металу відбувається переважно на анодних ділянках поверхні кородуючого металу.

### 5. Поляризація і деполяризація

Здебільшого електрохімічної корозії металів основними гальмівними явищами, які встановлюють певну кінцеву її швидкість, слугують явища поляризації. Протікання електричного струму при роботі корозійної мікрогальванічної пари обумовлено різницею потенціалів катода і анода. У момент замикання ланцюга мікрогальванічної пари корозійний струм за законом Ома становить [4]

$$I_{\text{поч}} = \frac{E_k^0 - E_a^0}{R}, \quad (1.4)$$

де  $E_k^0$  – початкові потенціали анода і катода (до замикання ланцюга), В;  $R$  – омичний опір системи, Ом.

Значення корозійного струму після замикання швидко падає і через певний час стає постійною. Оскільки омичний опір в цьому разі малий і постійний, то зменшення корозійного струму можна пояснити тільки зміщенням початкових значень потенціалів, тобто зменшенням їх різниці. Таку зміну потенціалів у результаті перебігу струму називають поляризацією, при цьому може відбуватися як поляризація анода, яка виражається в тому, що потенціал його стає більш позитивним, так і поляризація катода, що зумовлює зміщення його потенціалу в негативну сторону. Дослідження кінетики електродних процесів проводять вимірюючи зміну потенціалів електродів залежно від густини струму, який через них пропускається. Первинним результатом таких досліджень є анодні й катодні поляризаційні криві (рис. 1.5).

Під деполяризацією розуміють усунення поляризації під дією тих чи інших речовин, які називаються деполяризаторами. Відповідно до виду деполяризатора розрізняють корозію з водневою і кисневою

деполяризацією. У першому випадку на катоді відбувається відновлення іонів водню, наприклад, у гальванічній парі Zn/H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/Cu:



Доставка електронів до катода поляризує його, а іони водню (H<sup>+</sup>), що асимілюють електрони, виконують тим самим функцію деполяризатора. Воднева деполяризація відбувається в розчинах кислот з досить великою концентрацією іонів водню і навіть в нейтральному середовищі, якщо самі метали дуже активні [4].

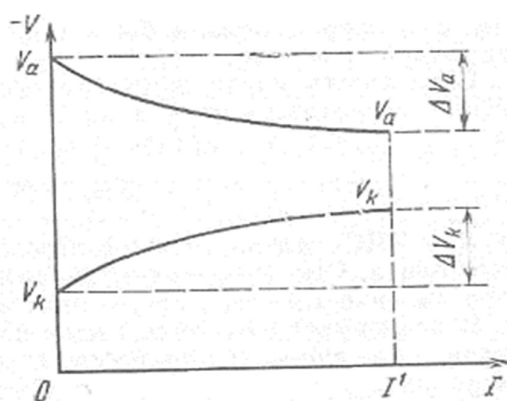
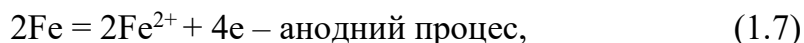


Рис. 1.5. Зміна потенціалу анода і катода гальванічного елемента зі збільшенням сили струму, що протікає через них.

При меншій активності металу та у нейтральних і лужних (іноді, слабо кислих) розчинах катодний процес перебігає переважно з кисневою деполяризацією. Наприклад, гальванічна пара Fe/H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, NaCl/Cu працює так:



У цьому випадку роль окислювача, що хімічно зв'язує електрони на катоді, виконують молекули розчиненого кисню. Хлористий натрій в

електродному процесі не бере участі й лише збільшує електропровідність розчину електроліту. Процеси корозії подібного типу носять назву корозії з кисневою деполяризацією.

Можлива і змішана деполяризація, в якій беруть участь і молекули кисню ( $O_2$ ), і іони водню ( $H^+$ ). Крім кисню і водню в процесах деполяризації можуть брати участь й інші окислювачі, наприклад, іони заліза ( $Fe^{3+}$ ) за реакцією



Гальванічні елементи будуть працювати активніше при збереженні різниці потенціалів на постійному і досить високому рівні, для цього необхідно, щоб швидкість електродних процесів не падала в часі, однак ця вимога часто порушується через різні труднощі в перебігу катодних і анодних реакцій. Наприклад, велика перенапруга водню на цинку, олові, свинці та ртуті гальмує катодний процес і, тим самим, сповільнює пов'язаний з ним анодний процес, що значно знижує швидкість корозії, тому метали з високою перенапругою водню розчиняються в кислотах повільно. Відповідно, домішки у сплавах, перенапруга водню на яких невелика, дуже небезпечні з т.з. протикорозійного захисту.

За умови постійної швидкості корозії явища поляризації анода і катода можна подати відповідними поляризаційними опорами і, що включаються послідовно у електричний ланцюг гальванічної пари. Тоді величину струму корозії  $I_c$  визначається наступним рівнянням [1]:

$$I = \frac{E}{R + R_{п.а} + R_{п.к}}, \quad (1.10)$$

де  $E$  – ЕРС гальванічного пари, В; – омичний опір розчину електроліту, Ом.

Залежно від того, яка з величин найбільше впливає на швидкість процесу корозії, розрізняють корозію з різним контролем:

- омичний контроль;
- анодний контроль;
- катодний контроль.

Можливий і змішаний контроль, коли складові в знаменнику майже однакові за величиною, наприклад, анодно–катодний, катодно–омичний, анодно–омичний або навіть анодно–катодного–омичний. Контролюючий процес необхідно знати для реалізації протикорозійних заходів, оскільки для сповільнення корозії в цілому необхідно гальмувати саме його, впливаючи на його лімітуючу стадію.

При роботі мікрогальванічних пар величина струму визначається поляризаційними опорами, оскільки омична складова дуже мала завдяки малій відстані між електродами. Проте у роботі макрогальванічних пар омичний опір відіграє значну роль.

У разі підземної та підводної корозії вуглецевих сталей з кисневою деполаризацією контролюючим процесом є відновлення кисню, а саме стадія його транспорту до поверхні катода внаслідок низької розчинності цього газу у воді (на рівні кількох міліграм на літр чистої води за стандартних умов). Тому корозію з кисневою деполаризацією можна назвати корозією з дифузійним контролем у випадку, коли метал не пасивується. Якщо ж катодний процес перебігає з виділенням водню, який мало залежить від дифузійних явищ внаслідок надзвичайно високої рухливості іонів гідроксонію, лімітуючою стадією стає одна з тих, що перебігають безпосередньо на межі поділу мела–електроліт [3].

#### 1.4. Фактори, що впливають на швидкість корозії

На швидкість перебігу процесів корозії впливають два види факторів – внутрішні і зовнішні [4].

**Внутрішні фактори**, що впливають на швидкість корозії, визначаються видом металу і його станом. До внутрішніх факторів електрохімічної корозії металів відносяться: природа металу, стан його поверхні, кристалічна структура і наявність структурних дефектів, наявність напружень і т.п.

**Природа металу.** За своєю природою щодо корозійної стійкості метали умовно можна розділити на: дуже нестійкі; нестійкі; такі, що легко пасивуються і вельми стійкі. Найбільш корозійно нестійкі метали розташовані в головних підгрупах I і II груп періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва.

Метали головних підгруп починаючи з II групи здатні утворювати пасивні плівки або плівки важкорозчинних вторинних продуктів корозії, захисні властивості яких часто визначають корозійну стійкість металів. Здатність пасивуватися у цих металів зростає зі зменшенням їх атомного номера.

Корозійна стійкість металів побічної підгрупи (міді, цинку, срібла, олова, свинцю та ін.) значною мірою залежить від їх термодинамічної стійкості, яка зростає у кожній підгрупі зі збільшенням їх атомного номера. Рідше корозійна стійкість збільшується внаслідок утворення захисних плівок у процесі корозії (наприклад,  $\text{AgCl}$ ,  $\text{PbSO}_4$  та ін.).

Найбільш корозійно стійкі метали знаходяться внизу підгрупи VIII (осмій, іридій, платина) та I (золото).

**Стан поверхні металу.** Неоднорідність поверхні металу є однією з причин виникнення місцевої корозії. Ретельне тонке оброблення поверхні (полірування) підвищує корозійну стійкість металів, полегшуючи

утворення більш досконалих і однорідних пасивних та інших захисних плівок. При грубій обробці істинна поверхня контакту металу з агресивним середовищем збільшується і ускладнюється формування однорідних захисних плівок, що призводить до посилення корозії. Найбільш активною є свіжооброблена поверхня металу. Вплив стану поверхні на швидкість корозії металу відіграє значну роль головним чином на початку корозійного процесу, поки тривалий перебіг корозії металу не виявив суттєвого, часто нівелюючого, впливу на шорсткість і склад поверхні. З практики відомо, що найбільшою мірою вплив стану поверхні проявляється при атмосферній корозії.

**Кристалічна структура металів і сплавів та її стан.** Кристалічна структура і наявність різних структурних дефектів позначається на процесах корозії металів і сплавів. У першу чергу руйнуються неупорядковані атоми, неповні ряди кристалічної решітки. Дефекти структури, що виходять на поверхню металу, також мають підвищену реакційну здатність, і по ним в першу чергу розпочинаються корозійні процеси. Сторонні домішки, що містяться в металі, мають тенденцію збиратися у лінійних дислокаціях і дірках по межах зерен. У процесі електрохімічної корозії це може привести до зниження корозійної стійкості, полегшення пітингових ушкоджень у місцях скупчення дислокацій [4].

Структурна неоднорідність сплавів і розмір зерен відіграють досить складну роль у процесах електрохімічної корозії. Ця роль залежить від характеру розподілу анодних і катодних фаз у сплаві, внаслідок чого структурна неоднорідність може як зменшувати, так і збільшувати корозійну стійкість металевих виробів. Стосовно величини зерен, то вона мало впливає на швидкість корозії за винятком випадків, коли корозія набуває міжкристалічного характеру. Прикладом може слугувати висока

корозійна стійкість “натуральних” булатів на основі заєвтектоїдних вуглецевих сталей з домішками карбїду ванадію. Така сталі структурно складаються з крупних кристалів твердого розчину вуглецю в залізі (анодна фаза) й великої кількості дрібнокристалічних фаз карбїдів заліза й ванадію (анодні фази, які є хорошими каталізаторами процесів кисневої і водневої деполяризації).

**Наявність механічних напружень.** За певних умов металеві конструкції в процесі експлуатації піддаються руйнуванню під спільною дією корозійного середовища і механічних напружень. За своїм походженням механічні напруження можуть бути внутрішніми і зовнішніми. Внутрішні напруження виникають в результаті деформації або при термообробці металу, а зовнішні – за рахунок навантажень, прикладених ззовні. Однакові за своєю природою вони поділяються на постійні та змінні. У будь-якому випадку вони знижують термодинамічну стійкість металу, оскільки надають його атомам додаткову енергію активації для виходу в розчин, можуть викликати неочікувані фазові перетворення у сплавах, порушити суцільність захисних плівок, чим підсилюють електрохімічну неоднорідність поверхні металевих виробів.

Крім механічних напружень метал може піддаватися стираючому і кавітаційному впливам, які прискорюють руйнування металевих конструкцій. Стираючий вплив, або корозія при терті, становить собою два пов'язаних процеси електрохімічної або хімічної взаємодії металу з агресивним середовищем і механічного зношення поверхневих захисних плівок і самого металу. Прикладами корозії під час тертя можуть бути впливи морської води на гребні гвинти суден, насоси, труби. Кавітаційний вплив виникає при певних гідродинамічних умовах, коли порушується суцільність потоку рідини, що рухається, і утворюються бульбашки, швидко когерентне заповнення рідиною яких створює кумулятивний

ефект гідравлічного удару. Ці удари створюють пульсуючі напруження і руйнують не тільки захисні плівки, а й сам метал з швидкістю до 75 мм на рік [3].

**Зовнішні фактори**, що впливають на швидкість корозії металів, визначаються природою і властивостями корозійного середовища і її параметрами. До зовнішніх факторів електрохімічної корозії металів відносяться: активність водневих іонів (рН), склад і концентрація розчинів, швидкість руху електроліту, температура, тиск, контакт з іншими металами, зовнішні й блукаючі струми, ультразвук, опромінення та ін.

**Активність водневих іонів.** Величина рН впливає на швидкість електрохімічної корозії металів, змінюючи потенціал катодних реакцій деполяризації, в яких беруть участь іони  $H^+$  або  $OH^-$ , на розчинність продуктів корозії і можливість утворення захисних плівок на поверхні кородуючого металу, а також на перенапругу електродних реакцій [1].

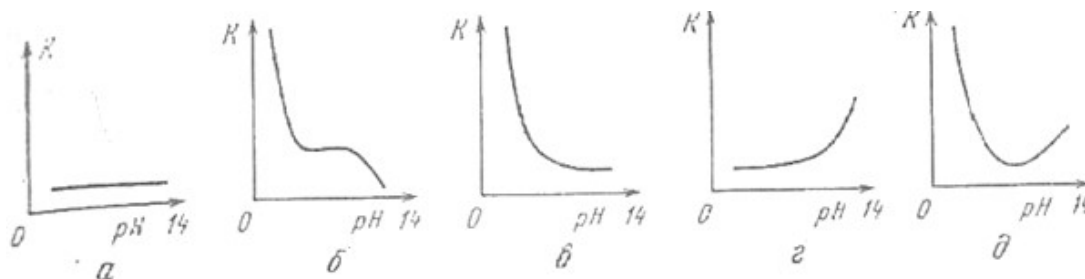


Рис. 1.6. Основні типи кривих залежності швидкості корозії металів  $K$  від рН середовища.

Усі метали за залежністю швидкості електрохімічної корозії від величини рН можна умовно розбити на п'ять груп:

а) благородні метали (золото, платина і срібло), швидкість корозії яких практично не залежить від величини рН (рис. 1.11, а;

б) метали (магній, манган і залізо) малостійкі в кислих, недостатньо стійкі в нейтральних і корозійностійкі в лужних розчинах (рис. 1.11,б;



в) метали (нікель, кобальт і кадмій), які нестійкі в кислих, але корозійностійкі в лужних розчинах, завдяки високим захисним властивостям окисних і гідроокисних плівок (рис. 1.11, в;

г) метали (Ta, Mo і W), які корозійностійкі в кислих, але нестійкі в лужних розчинах (рис. 1.11, г;

д) метали (Zn, Al, Sn, Pb, Bi, Be, Cu), які корозійностійкі в нейтральних розчинах і нестійкі в кислих і лужних (рис. 1.11, д.

Залежність швидкості корозії від рН розчинів може бути ускладнена утворенням важкорозчинних захисних плівок (наприклад,  $\text{PbSO}_4$  і  $\text{FeSO}_4$ ) або пасивуванням (наприклад, заліза в 50 ... 60% –відсотковому розчині  $\text{HNO}_3$ ). Таким чином, для швидкості електрохімічної корозії металів в кислих розчинах має важливе значення не тільки величина рН, а й природа кислоти.

**Склад і концентрація нейтральних розчинів.** Корозія більшості металів у нейтральних розчинах (воді і водних розчинах солей) перебігає з кисневою деполяризацією, а її швидкість сильно залежить від швидкості стадій іонізації та підведення кисню до поверхні металу, у той час як вплив рН близьких до нейтральних розчинів незначний або навіть відсутній. Це зумовлено здатністю важкорозчинних продуктів корозії підтримувати певне значення рН розчину біля поверхні металу відповідно до добутку розчинності утвореного гідроксиду [4].

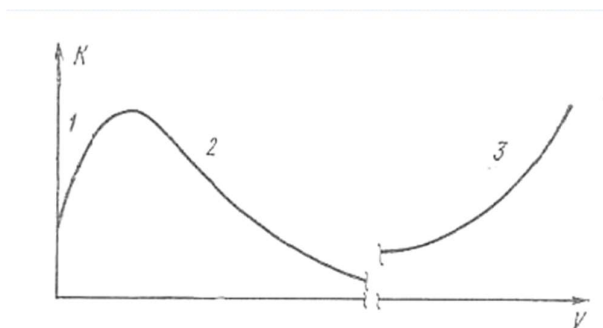
Швидкість електрохімічної корозії металів в розчинах солей так само, як і в кислотних розчинах, залежить від природи розчиненої солі та її концентрації:

— водні розчини солей, що гідролізують, впливають на швидкість корозії відповідно до зміни рН, яку вони спричиняють;

- розчинена у воді сіль утворює в результаті взаємодії з первинним анодним або катодним продуктом корозії металу плівку важко-розчинної сполуки;
- розчини солей, що володіють окисними властивостями, підвищують швидкість корозії металів, якщо ці солі є катодними деполяризаторами. Ефект прискорення корозії зростає зі збільшенням концентрації окисної солі, але якщо вони пасивують метал, то швидкість корозії сильно знижується за певної концентрації пасиватора (наприклад, корозія заліза в розчинах нітратів і нітритів);
- катіони і особливо аніони солей, адсорбуючись на поверхні металу, що кородує, і змінюючи будову подвійного електричного шару або руйнуючи захисну пасивну плівку, можуть впливати на перебіг електродних процесів електрохімічної корозії металів, з цього слідує, що вони можуть змінювати швидкість корозії;
- солі, що утворюються з іонами кородуючого металу комплекси, сильно зміщують потенціали анодного процесу, зменшуючи концентраційну поляризацію, що призводить до збільшення швидкості корозії до певної межі.

**Швидкість руху електроліту.** Часто істотно впливає на швидкість корозії надає швидкість руху електроліту. Особливо сильно це помітну випадку корозії металу в нейтральних електролітах, у яких процеси корозії перебігають з кисневою деполяризацією. Залежність швидкості корозії від швидкості руху електроліту в цьому випадку представлена у вигляді кривої на рис. 1.12. Тут можна виокремити три характерних ділянки: 1 – збільшення швидкості корозії за рахунок прискорення дифузії кисню до поверхні металу; 2 – зменшення швидкості корозії за рахунок утворення на поверхні захисної окисної плівки; 3 – зростання швидкості корозії за

рахунок механічного (ерозійного або кавітаційного) руйнування захисної плівки потоком електроліту, що рухається [1].



*Рис. 1.7.* Узагальнена крива залежності корозії металу  $K$  від швидкості електроліту: 1 – збільшення швидкості корозії за рахунок збільшення швидкості дифузії кисню до поверхні металу; 2 – зменшення швидкості корозії за рахунок утворення на поверхні металу захисної плівки; 3 – збільшення швидкості корозії за рахунок ерозійного або кавітаційного руйнування захисної плівки рухомим потоком електроліту

**Температура.** Зміна температури середовища істотно впливає на швидкість електрохімічної корозії металу, тому що зі збільшенням температури зростають швидкість дифузії, розчинність продуктів корозії, знижується величина перенапруги на електродах. За підвищенням температури середовища швидкість електрохімічної корозії, зазвичай, зростає (рис. 1.13).

Зміна швидкості корозії металу в залежності від температури може бути виражена рівнянням [1]

$$K = Ae^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (1.11)$$

де – швидкість корозії; – деяка постійна величина; – величина енергії активації; – молярна газова стала; – абсолютна температура. Такий вид залежності швидкості корозії від температури характерний для

неблагородних металів, наприклад заліза, при процесах, що перебігають з водневою деполяризацією. Можливі виключення із зазначеного, щопов'язано з появою захисних плівок або зменшенням кількості кисню в розчині з підвищенням температури в відкритих системах.

Неоднакова температура окремих ділянок металу може приводити до виникнення термогальванічних пар, у яких більш нагріта ділянка, як правило, є анодом [3].

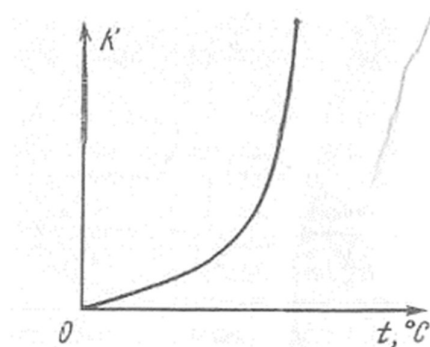


Рис. 1.8. Залежність швидкості корозії від температури

**Тиск.** Змінювання швидкості електрохімічної корозії за рахунок тиску відбувається внаслідок зміни розчинності газів, що беруть участь в коррозійному процесі, наприклад кисню або вуглекислоти; полегшення процесів гідролізу розчинених у воді солей; появи механічних напружень в металі. При збільшенні тиску зростає швидкість корозійних процесів, що йдуть з кисневою деполяризацією. При зміні тиску при процесах корозії, що протікають з водневою деполяризацією, швидкість корозії не зростає.

**Контакт з іншими металами.** Відомо, що два металу, що знаходяться в контакті один з одним і мають різні електродні потенціали, утворюють в електроліті гальванічний елемент, робота якого впливає на швидкість корозії кожного з цих металів. Метал, що має більш негативний електродний потенціал, посилено кородує, а корозія металу з більш позитивним електродним потенціалом послаблюється або зовсім

припиняється. Тому конструювання різних споруд слід проводити у врахуванням виникнення і функціонування контактних гальванічних пар, що можуть призвести споруду до виходу з ладу в результаті корозійного руйнування окремих елементів.

Матеріали, що використовують на практиці, можуть бути розміщені у такій послідовності з точки зору зростання їх потенціалу: магній, магнієві аноди (6% Al і 3% Zn), алюміній (оболонки кабелю), кадмій, сталь, залізо, чавун, нержавіюча сталь, припой ПОС (Pb–Sn), свинець, олово, нікель, латунь, мідь, бронза, графіт, вуглецеві матеріали, кокс. Перший матеріал є найбільш електронегативний, а останній – найменш електронегативний. Чим далі матеріали стоять один від одного в цьому ряді, тим сильніше небезпека корозії для більш електронегативного матеріалу.

**Зовнішні струми.** Якщо через метал пропускати електричний струм від зовнішнього джерела, тобто поляризувати метал анодно або катодно, то будуть спостерігатися такі явища, як при анодній або катодній поляризації. При анодній поляризації зовнішнім струмом зазвичай збільшується розчинення металу. Воно зростає з підвищенням анодної густини струму і одночасно супроводжується деяким зменшенням розчинення металу у результаті роботи його мікрогальванічних пар. При катодній поляризації зовнішнім струмом у більшості випадків спостерігається захисний ефект, тобто зменшення корозії металу. Цей ефект зростає зі збільшенням захисної густини струму аж до повного припинення електрохімічної корозії. У цьому випадку потенціал катодно поляризованого металу досягає значення його оборотного потенціалу в даних умовах або навіть стане негативнішим цього значення [4].

Захисний ефект при катодній поляризації металу від зовнішнього джерела постійного струму знаходить широке практичне застосування і

називається зазвичай катодним захистом зовнішнім струмом. При здійсненні катодного захисту зовнішнім струмом слід мати на увазі, що поляризація металу змінює рН розчину в приелектродній області. Анодна поляризація супроводжується підкисленням розчину, а катодна – його підлужовує. Ці вторинні ефекти поляризації зовнішнім струмом можуть в ряді випадків істотно вплинути на корозійну стійкість металу і особливо після відключення дії зовнішнього джерела струму.

Поляризація зовнішнім змінним струмом заліза, міді, олова, цинку збільшує їх корозію. Що стосується таких електронегативних металів, як алюміній і магній, то вони при поляризації змінним струмом корозійно нестійкі [3].

**Блукаючі струми.** Джерелами блукаючих струмів в землі є електрична установки, що використовують землю частково або повністю як струмопровід (електричні залізниці, трамвай, метро, лінії передавання енергії постійного струму по системі «провід – земля», катодні установки і т. д.). Блукаючий струм, що протікає через електроліт, в якому міститься металева конструкція, впливає на швидкість і характер розподілу корозійного руйнування. Там де він потрапляє з електроліту у металеву конструкцію виникає катодна зона, а там, де він потім стікає з неї в електроліт виникає анодна зона – зона анодного розчинення металу.

**Ультразвук.** Вплив ультразвуку на процеси електрохімічної корозії забезпечується за рахунок: переміщення електроліту, яке усуває концентраційну поляризацію; активаційного впливу на частинки, що реагують, і впровадження їх в подвійний електричний шар; місцевого підвищення температури і тиску; створення механічних напружень та ін. Характер впливу ультразвуку на систему визначається переважанням одного або декількох з перерахованих вище факторів.

**Опромінення.** При опроміненні слід враховувати дію основних складових радіоактивного випромінювання (нейтронів, протонів,  $\alpha$ - і  $\beta$ -частинок,  $\gamma$ -випромінювання) на метали і корозійне середовище. Дія випромінювання на метали полягає в порушенні їх кристалічної решітки при пружних зіткненнях носіїв іонізуючого випромінювання з ядрами атомів металу, що кородує, і термічних перетвореннях, що призводить до зниження пластичності, зростання опору пластичної деформації, зростання електропровідності, прискоренню процесів дифузії і т. д.

Дія випромінювання на корозійне середовище є процесом іонізації та збудження в результаті поглинання енергії випромінювання, що призводить до зміни хімічного потенціалу корозійного середовища та розпаду молекул на атоми і радикали.

З огляду на різнобічну дію процесів опромінення на перебіг процесів корозії, можна зробити загальний висновок про те, що радіоактивне випромінювання в деяких випадках значно збільшує швидкість корозії металів, проте часто не виявляє значного впливу на швидкість корозії, а іноді навіть має захисну дію [4].

### **1.5.Методи захисту металів від корозії**

1. Створення антикорозійних сплавів (легування).
2. Збільшення чистоти індивідуального металу.
3. Механічна та хімічна пасивація металів (залізо в концентрованих сірчаній або азотній кислотах; залізо, нікель, кобальт, магній у розчинах лугів; утворення оксидної плівки, наприклад, на алюмінії тощо).
4. Покриття поверхні металу різними захисними плівками. Плівки поділяють на:
  - неметалічні (фарби, лаки, мастильні матеріали);
  - металічні: анодні, катодні [4].

**Анодним** називають покриття, що утворене металом, який стоїть в ряді напруг до металу, що захищають (покриття активнішим металом; наприклад, покриття заліза цинком, кадмієм). При місцевих руйнуваннях покриття кородувати буде менш благородний метал, оскільки утворюватиметься локальний гальванічний елемент, в якому катодом є метал, що захищають (основний метал), а анодом – покриття, яке окислюється. При анодному захисті суцільність покриття значення не має. Чим товщим є анодне покриття, тим довше воно буде захищати інший метал [1].

**Катодним** називають покриття металом з більшим потенціалом (зазначенням потенціалу у ряду напруг стоїть після металу, що захищають, наприклад покриття низьколегованих сталей міддю, оловом, нікелем, сріблом). Покриття повинно бути суцільним, оскільки при його пошкодженні утворюватимуться локальні гальванічні елементи, в яких основний метал буде анодом (кородуватиме), а метал–покриття – катодом.

5. електрохімічний захист [4]:

– **катодний** – створення катодної поляризації: металевий виріб підключається до негативного полюсу зовнішнього джерела постійного струму (стає катодом, при цьому зростає швидкість виділення на ньому водню, а швидкість корозії знижується), а до позитивного полюсу приєднують малоцінний метал; у такий спосіб вельми часто захищають підземні трубопроводи;

– **протекторний** – аналогічний до анодного покриття: з'єднують основний метал з іншим металом (протектором), який в ряді напруг розташований лівіше. Утворюється гальванічний елемент, в якому основний метал – катод, а протектор – анод (кородує). Часто для протекторного захисту застосовують магній або алюміній (захищають



рейки, щогли та інші конструкції). Протектор поступово розчиняється, тому його потрібно періодично замінювати. Протекторний захист ефективний у струмопровідному середовищі (наприклад, у морській воді).

6. Дія на агресивне середовище – цей метод є ефективним тоді, коли йдеться про не дуже великий об'єм струмопровідної рідини:

- **деаерація** – вилучення кисню з агресивного середовища внаслідок продування інертним газом;

- введення в середовище **інгібіторів** – уповільнювачів корозії.

Наприклад, у випадку кислотної корозії зазвичай це органічні речовини, молекули яких містять аміно– іміно–, тіо– та інші групи. Вони добре адсорбуються на поверхні металу та суттєво знижують швидкість електрохімічних реакцій, що призводять до корозії [1].

## РОЗДІЛ 2. КОРОЗІЙНИЙ МОНІТОРИНГ

### 2.1 Мета та завдання корозійного моніторингу

*Моніторинг* – безперервний контроль стану середовища. Корозійний моніторинг – контроль швидкості корозії об'єкта.

*Задачі корозійного моніторингу:*

- 1) Оцінити поточний корозійний стан об'єкта
- 2) Відслідковувати вплив різних факторів на корозію:
  - концентрації окисника;
  - рН, солевміст, склад середовища;
  - режим роботи (температура, тиск, швидкість потоку);
- 3) Прогнозування терміну служби об'єкта;
- 4) Попередження позаштатних режимів роботи та аварій.

*Схема системи корозійного моніторингу*

- 1) Первинний вимірювальний перетворювач (ПВП) – пристрій, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання, дає нормований сигнал.

Датчик – вимірювальний пристрій у вигляді сукупності одного або декількох перетворювачів, який виробляє вихідний ненормований сигнал, перетворює швидкість корозії у вимірювану величину.

- 2) Корозиметр – пристрій, який вимірює опір
- 3) Контролер – виконує функцію індикації, реєстрації, перераховує вимірювану величину в мм/рік, г/рік.

### 2.2. Методи та приладикорозійного моніторингу

#### 2.2.1. Контроль на основі параметрів середовища

Хімічний аналіз – ґрунтується на дослідженні хімічного складу середовища

- за величиною рН

- за вмістом кисню.

### 2.2.2.Резистивний метод

Резистометрія – фізичний метод, суть якого полягає у зміні опору при зміні товщини стінки досліджуваного об'єкта. Резистометр – пропускає певну величину струму і знаходить опір, перераховує в мм/рік.

**Датчики швидкості корозії ДСК–1**(рис. 2.1) і **ДСК–2**представляють собою стаціонарні пристрої системи діагностики підземних металоконструкцій на предмет їх корозійної стійкості[5]. Прилади призначені для визначення швидкості корозії, якій піддаються металеві підземні споруди, при перебуванні в середовищі з високою корозійною активністю, наприклад, у ґрунті або в ґрунтових водах.

Датчик швидкості корозії також застосовується для прогнозування та контролю корозійного стану зовнішньої поверхні трубопроводів та інших підземних комунікацій. Користувачами даного пристрою є підприємства, які обслуговують та експлуатують нафто–і газопроводи.



*Рис.2.1. Датчики швидкості корозії ДСК–1*

Датчик корозії складається з трьох індикаторів, виготовлених зі сталевого дроту, та контактної рамки, з'єднаних між собою кабелем з чотирьох жил. Прилад встановлюють у ґрунт або на поверхні трубопроводу, або поблизу на тій самій глибині, як у зоні дії

електрохімічного захисту, так і поза ним. Проводи датчика підключають до щита контрольно–випробувального пункту, забезпечуючи електричний контакт між кожним індикатором и контактною рамкою.

Корозійна активність ґрунту та стан електрохімічного захисту залежать від хімічного складу та структури металу споруди, а також від ґрунтово–кліматичних умов. Ступінь схильності до корозії визначається часом, за який відбудеться повне руйнування чутливих елементів датчика (от моменту його встановлення до втрати електропровідності одиничних індикаторів).

Таблиця 2.1. Технічні характеристики датчика швидкості корозії ДСК–1

Показники	Величини
Габаритні розміри датчика без з'єднувального кабелю, мм	16 × 40 × 66
Маса датчика швидкості корозії без кабелю, г	20
Довжина з'єднувального кабелю для типового виконання, м	4,5
Діапазон температур кліматичних зон установки датчиків, °С	від –60 до +50
Діаметри одиничних індикаторів для датчиків, мм:	
ДСК–1 – три індикатора з номінальними діаметрами, мм;	0,5; 1,0; 1,6
ДСК–2 – три індикатори з номінальними діаметрами, мм;	0,25; 0,5; 1,6

Вимірюючи електропровідність ланцюгу: індикатор–контактна рамка, датчик встановлює момент початку руйнування елементу та здійснює періодичний моніторинг його стану. При наявності замкнутого електричного ланцюга спрацьовує світловий індикатор, а у випадку його відсутності індикатор не засвітиться. швидкість корозії визначається по формулах, вказаних в методиці вимірювань, що додається о виробу. Періодичність вимірів встановлюється ГОСТом Р 51164.

Складність застосування: чим коротший проміжок часу проводиться дослідження, тим нижча точність, тим точніший потрібен резистометр.

**Індикатор ДК–1Ц** (рис. 2.2) призначений для дистанційного вимірювання швидкості корозії в дефектах ізоляційних покриттів підземних трубопроводів, прокладених в різних ґрунтах, з метою визначення ефективності електрохімічного захисту на різних ділянках споруди, а також для визначення напрямку і величини блукаючих струмів у землі.

Робота індикатора ДК–1Ц ґрунтується на зміні електричного опору металічного провідника зі зменшенням його поперечного перерізу в результаті корозії.

Величина швидкості корозії ( $K/t$ ) розраховується за формулою:

$$K/t = A \cdot h_o (1 - R_o / R_t) \quad (2.1)$$

де  $R_o$  и  $R_t$  – початковий опір індикатора та опір індикатора після знаходження в ґрунті певний час  $t$ ;  $h_o$  – вихідна товщина робочого елемента індикатора;  $A$  – коефіцієнт пропорційності, значення якого залежить від обраної розмірності величини швидкості корозії (грам, мкм, мм/рік, доба, рік).



Рис. 2.2. Індикатор вимірювання швидкості корозії ДК–1Ц

Значення  $R_t$  перераховується на ізотермічні умови з урахуванням температурного коефіцієнту сталі. Наприклад, значення опору індикатора

приводиться до температури 0°C ( $R_{\text{прив}}$ ). Значення  $R_{\text{прив}}$  розраховується виходячи з вимірюного опору індикатора ( $R_{\text{вим}}$ ) за формулою:

$$R_{\text{прив}} = R_{\text{вим}} / (1 + 4,4 \cdot 10^{-3} t) \quad (2.2)$$

де  $t$  – температура ґрунту (°C).

Таблиця 2.2. Технічні характеристики індикатора ДК–1Ц

Межі вимірювань швидкості корозії, мкм/рік	– 5 ... 5000
Активна робоча поверхня індикатора, кв. см	340
Матеріал робочого елемента індикатора	Маловуглецева сталь
Товщина робочого елемента, мкм	100
Виконання контактної вузла	герметизоване
Величина початкового опору зурахуванням опору вимірювального кабелю (2 метри)	Ом
Робоча температура, °C	–5 ... + 40
Термін служби умовах ефективного електрохімічного захисту, менше, років	в не 7
Габаритні розміри, мм	діаметр 40, довжина 435
Довжина дроту, м, не менше	2,0
Маса, г	300

Датчик швидкості корозії ДСК–1 «Менделєєвець» (рис. 2.3) використовується для вимірювання глибини та швидкості корозії підземних сталевих споруд. Датчики дозволяють оцінити ефективність електрохімічного захисту підземної металічної споруди і визначити ступінь корозійної небезпеки.



Рис. 2.3. Резистивний датчик швидкості корозії ДСК–1 «Менделєєвець»

Датчики встановлюють стаціонарно в ґрунт, поблизу від підземної сталевих споруди. Датчики забезпечує точність і стабільність вимірів, що не залежить від вимірювального приладу, а забезпечується датчиком, за рахунок вбудованої вимірювальної схеми [6-10].

### 2.2.3. Метод поляризаційного опору

Метод поляризаційного опору дозволяє виміряти швидкість корозії в режимі реального часу. Він базується на оберненій залежності між струмом корозії та поляризаційним опором. Поляризаційним опором  $R_{\Pi}$  називають нахил поляризаційної кривої при корозійному потенціалі  $E_{кор}$  (2.3) [11]:

$$R_{\Pi} = \left. \frac{dE}{dI} \right|_{E_{кор}} \quad (2.3)$$

Визначення поляризаційного опору графічно наведено на рис. 2.4.

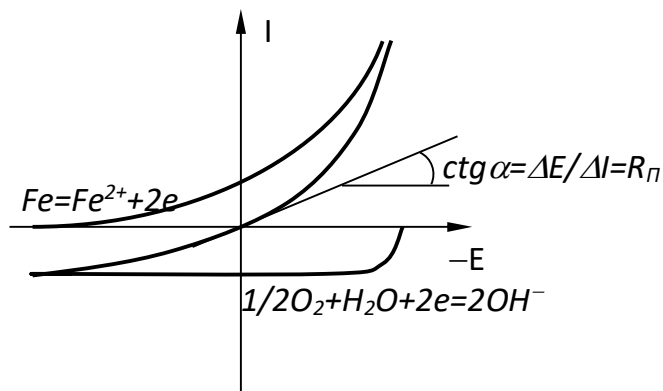


Рис.2.4. Схема визначення поляризаційного опору сталі із сумарної поляризаційної кривої в нейтральному середовищі в присутності кисню.

Вперше обернену залежність між струмом корозії і поляризаційним опором було запропоновано в роботі Вагнера і Трауда [12]. Пізніше аналогічну залежність для кородуючого електрода з водневою деполаризацією отримали Стерн і Джірі [13]:

$$R_{\Pi} = \frac{b_a \cdot b_k}{2,3(b_a + b_k)} \cdot \frac{1}{I_{кор}} = K \cdot \frac{1}{I_{кор}}, \quad (2.4)$$

де  $b_a$ ,  $b_k$  – Тафелевські нахили анодної і катодної поляризаційних кривих, мВ.

Залежність (2.4) широко відома як основне рівняння методу поляризаційного опору. Коефіцієнту пропорційності  $K$  в літературі приділено велику увагу. В огляді Мансфелда щодовизначення струму корозії методом поляризаційного опору наведено більше десятка посилань на праці із знаходження  $K$  для різних корозійних систем [14]. Не зважаючи на значні зміни Тафелевських нахилів в різних умовах,  $K$  змінюється лише в межах від 13 до 52 мВ для більшості проаналізованих систем. Це дає підставу використовувати метод поляризаційного опору для визначення



швидкості корозії багатьох систем, яка може відрізнятися на декілька порядків.

Подальшого розвитку метод поляризаційного опору зазнав в роботах Антропова [11] та співробітників [15-16], де було розширено межі застосування методу поляризаційного опору для корозійних систем з дифузійним та пасиваційним контролем. Систематично проаналізовані та запропоновані залежності для розрахунків похибок вимірювання поляризаційного опору, зумовлені нелінійністю поляризаційних кривих. У праці Ю.С. Герасименка показано, що найменші похибки при вимірюванні поляризаційного опору в водному нейтральному середовищі виникають при застосуванні двохелектродної комірки. Починаючи з цих робіт, двохелектродні датчики набули широкого поширення [15].

Точність розрахунку швидкості корозії за величиною поляризаційного опору залежить від надійності рівнянь, що зв'язують  $I_{кор}$  та  $R_{П}$ . Значення коефіцієнта пропорційності  $K$ , що входить в ці рівняння, можна розрахувати теоретично за нахилами тафелевських ділянок поляризаційних кривих, та отримати експериментально, якщо використати незалежний метод визначення швидкості корозії, наприклад, за втратою маси зразка. Розгляд чисельних літературних даних, а також дослідних даних, отриманих корозіоністами кафедри електрохімії КПІ ім. Ігоря Сікорського, показав, що експериментальні значення досить часто не узгоджувались з теоретичними. Однією з причин розбіжностей могли бути недосконалість рівнянь розрахунку  $K$ , виведені на основі кінетичної теорії Ердей–Груза та Фольмера, що не враховувала структуру подвійного електричного шару [16].

Ю.С. Герасименком на основі теорії електрохімічної перенапруги Фрумкіна виведені співвідношення методу поляризаційного опору для всіх основних корозійних систем з урахуванням тонкої структури

побудови подвійного електричного шару. Це суттєво знизило розбіжності між теоретичними і експериментальними даними, особливо при корозії в розведених розчинах (природних водах) чи при наявності в корозійному середовищі поверхнево активних речовин (інгібіторів корозії), і значно збільшило надійність методу поляризаційного опору [11].

На сьогоднішній день відомі різні підходи до вимірювання поляризаційного опору. Визначення поляризаційного опору можна проводити, виконуючи циклічну поляризацію електрода в області, близькій до потенціалу корозії. З даних визначають кут нахилу дотичної до кривої в точці  $E_{кор}$ . Значення поляризаційного опору залежать від швидкості сканування потенціалу. На величину поляризаційного опору також впливає дрейф  $E_{кор}$  [17]

Більш простими є імпульсні способи: потенціостатичної або гальваностатичної поляризації. Метод гальваностатичної поляризації дає змогу визначати вклад омичних складових при вимірюванні, тому є більш надійним.

Принцип вимірювання ґрунтується на моделюванні меж розділу «електроди – електроліт» двохелектродного датчика у вигляді еквівалентної схеми, наведеної на рисунку 2.5, де ємність  $C_{\Pi}$  відповідає поляризаційній ємності, яка включає ємність подвійних електричних шарів на кожному з електродів [17]. Паралельно цій ємності підключений резистор  $R_{\Pi}$ , що моделює суму поляризаційних опорів на обох електродах датчика. Резистор  $R_{\Pi}$  моделює опір електроліту в міжелектродному просторі [18].

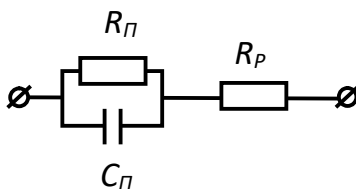


Рис.2.5. Спрощена схема еквівалента двохелектродного датчика.

У процесі вимірювання імпульсним методом гальваностатичної поляризації корозиметр генерує прямокутний імпульс струму  $I$ , як показано на рис.2.6. При цьому різниця потенціалів на електродах датчика змінюється майже миттєво від початкового стаціонарного значення різниці корозійних потенціалів обох електродів  $\Delta E_{кор}$  на величину  $IR_{п}$  і далі експоненційно зростає у часі внаслідок зарядження  $C_{п}$  до величини  $\Delta U = 2IR_{п}$ .

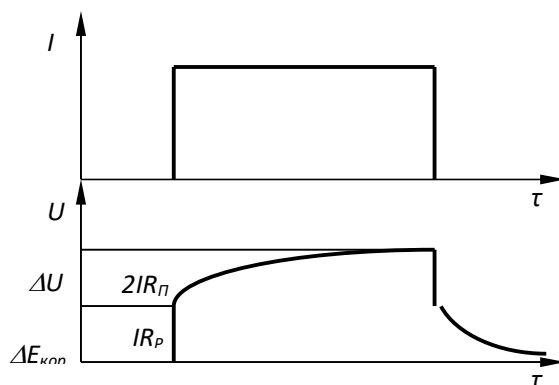


Рис.2.6.Епюри зміни струму  $I$  та напруги  $U$  при вимірюванні поляризаційного опору  $R_{п}$  гальваностатичним методом на двохелектродному датчику.

Після відключення струму відбувається зворотний процес миттєвого спаду омичної складової та розрядження  $C_{п}$ . Віднімаючи величину  $IR_p$  падіння напруги від загальної зміни напруги на електродах, прилад вираховує значення  $2IR_{п}$  напруги і, відповідно, величину  $R_{п}$ .

Фото портативного індикатора корозії ІК-4п з датчиком ДК-1 та стаціонарного індикатора корозії ІК-4с з датчиком ДК-2 на промислових об'єктах наведено на рисунку 2.7.



*Рис. 2.7.* Портативний індикатор корозії ІК-4п за датчиком ДК-1 на водозабірній станції (зліва) та стаціонарний індикатор корозії ІК-4с з датчиком ДК-2 на котельній (справа).

## РОЗДІЛ 3. АКТИВНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ ОБЛАДНАННЯ ВІД КОРОЗІЇ

### 3.1. Катодний захист металів

Залежність швидкості електрохімічної реакції від потенціалу електрода дає принципову можливість змиження швидкості анодного розчинення металу за рахунок зовнішньої поляризації. Зміщення потенціалів в негативну сторону під дією зовнішнього джерела струму дозволяє змістити рівність швидкостей катодної та анодної реакції  $i_k = i_a$  на поверхні металу в бік збільшення швидкості катодної реакції з відповідним зменшенням швидкості анодного розчинення металу. Відбувається так званий катодний захист металу [19].

Теоретично повний захист металу від корозії при катодній поляризації можливий тоді, коли металу буде надано потенціал більш негативний, ніж термодинамічно обумовлений рівноважний потенціал металу. Величина захисного ефекту при деякому зсуві потенціалу  $\Delta E$  визначається здатністю системи до катодної та анодної поляризації  $\Delta E / \Delta i$ . Катодний захист ефективний тоді, коли метал має значну здатність до катодної поляризації та малу до анодної, тобто для зміщення потенціалу системи до потенціалу захисту  $E_3$  потрібні відносно невеликі струми.

Катодний захист зовнішнім струмом – захист металу за допомогою постійного струму від зовнішнього джерела, при якому метал, який захищають, приєднують до негативного полюса джерела постійного струму (як катод), а до позитивного полюса – допоміжний електрод (анодне заземлення), котрий в свою чергу, поляризують анодно. Такий захист застосовується в тих випадках, коли метал не є схильним до пасивації, тобто має протяжну область активного розчинення, вузьку

пасивну область та високі значення критичного струму і потенціалу пасивації [20].

Принципова схема катодного захисту зовнішнім струмом наведена на рис. 3.1а. Від негативного полюса джерела 1 через провідник 2 струм збирається у місце приєднання дренажу 3 на трубу 4, яку захищають. Струм потрапляє у трубу через дефектні місця в ізолюючому покритті 5 з ґрунту, куди він розтікається з анодного заземлення 6, яке підключене провідником 7 до позитивного полюса свого джерела [19].

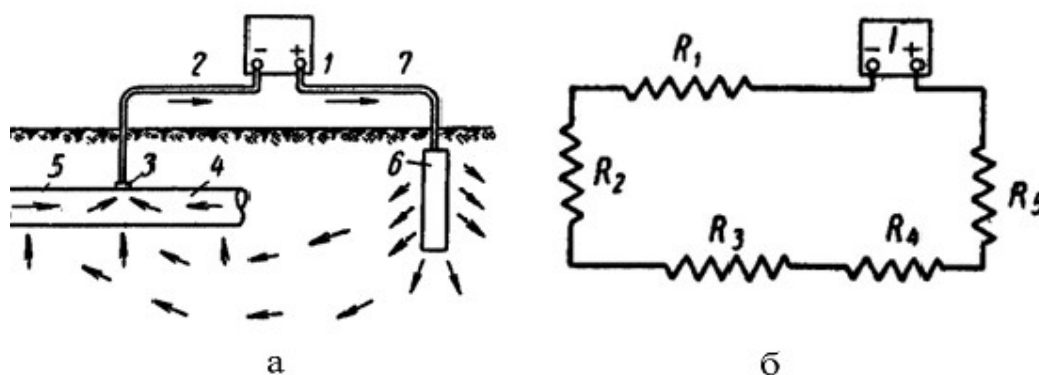


Рис. 3.1. Схеми катодного захисту зовнішнім струмом:

а– принципова схема: 1 – джерело постійного струму; 2 – дренажний кабель; 3 – пункт дренажу; 4 – труба, яку захищають; 5 – ізолююче покриття; 6 – анодне заземлення; 7 – з’єднувальний кабель; б– електрична схема: 1 – джерело постійного струму;  $R_1$  – опір дренажного кабелю;  $R_2$  – опір труби;  $R_3$  – перехідний опір між трубопроводом і ґрунтом;  $R_4$  – опір розтікання анодного струму;  $R_5$  – опір провідника анодного заземлення.

Таким чином, поверхня металевої підземної споруди поляризується катодно і захищена від корозійного руйнування. Активному руйнуванню піддається анодне заземлення, яке досить часто виконують із металевого брухту: старих труб, рейок тощо, або виготовляють спеціально з корозійно стійких у ґрунті матеріалів.

Електрична схема катодного захисту зовнішнім струмом наведена на рис. 3.1б і графічно представляє всю систему як послідовну суму омичних опорів. Варто зауважити, що опір розтікання струму з аноду  $R_4$  може

становити від 50 до 80 % від всієї суми, оскільки відносно великий струм має розтікатися з відносно малої площі поверхні анодного заземлення в обмеженому об'ємі ґрунту, який до того ж піддається так званому анодному електроосмотичному осушенню. Опір обох кабелів ( $R_1 + R_5$ ) може сягати 50 % не зважаючи на низький питомий опір металу, з якого вони виготовлені, оскільки вартісний кольоровий метал необхідно економити. Перехідний опір між трубою і ґрунтом  $R_3$  часто не переважає 10 %, включаючи опір  $R_2$  самої конструкції, яку захищають. При цьому, поляризаційний опір власне електрохімічної реакції, що забезпечує катодний захист труби, становить 1...5 %. А омичним опором ґрунту взагалі нехтують як нескінченно малою величиною, оскільки вплив практично нескінченного перетину ґрунту як провідника значно переважає вплив його високого питомого опору.

Для розрахунку катодного захисту трубопроводу зовнішнім струмом необхідні такі вихідні дані: 1) довжина ділянки трубопроводу, що захищають –  $2l$ , м; 2) діаметр трубопроводу: зовнішній  $D_z$  і внутрішній  $D_v$ , мм; 3) опір покриття  $R_n$ , Ом·м; 4) опір металу труби  $R_m$ , Ом/м; 5) захисний негативний потенціал на кінцевих ділянках трубопроводу, що захищають, В [21].

### **3.1.1. Потенціал повного катодного захисту сталі**

Потенціалом повного катодного захисту називають значення потенціалу металу, при якому припиняється корозійний процес. Хоча катодний електрохімічний захист металів застосовується порівняно давно, але при виборі потенціалу, необхідного для захисту сталі від корозії, зазвичай виходили із дослідних даних. Це пояснюється складністю теоретичного обґрунтування величини захисного потенціалу. Разом із тим

визначення захисного потенціалу відноситься до числа основних питань, які доводиться вирішувати при розрахунку електрохімічного захисту.

Теоретичне значення захисного потенціалу порівняно просто оцінити на основі теорії багатоелектродних систем. Згідно останньої, для повного припинення корозії потрібно поляризувати металеву конструкцію, котру захищають, до значення потенціалу найбільш негативної анодної складової її поверхні. Для сталевих конструкцій таким потенціалом є теоретичний рівноважний потенціал заліза (фактично, фериту) в даному розчині електролітів, тобто  $E_z = E_{Fe}$ .

Залізо при корозії переходить в розчин у вигляді двовалентних іонів. Значення оборотного потенціалу заліза в електролітах може бути при цьому розраховане за рівнянням [19]:

$$E_{Fe,Fe^{2+}} = E_{Fe,Fe^{2+}}^0 + \frac{RT}{2F} 2,303 \lg a_{Fe^{2+}}, \quad (3.1)$$

де  $E_{Fe,Fe^{2+}}^0$  – стандартний потенціал заліза;

$R$  – газова постійна;

$T$  – абсолютна температура;

$F$  – число Фарадея;

$a_{Fe^{2+}}$  – активність іонів заліза у приелектродному шарі електроліту.

За  $pH > 5,5$  іони заліза, взаємодіючи із гідроксильними іонами, утворюють важкорозчинний гідроксид заліза(II). У цьому разі рівняння (3.1) може бути перетворено наступним чином:

$$E_{Fe,Fe^{2+}} = E_{Fe,Fe^{2+}}^0 + \frac{RT}{2F} 2,303 \lg \frac{L_{Fe(OH)_2}}{a_{OH^-}^2} = VE_{Fe,Fe^{2+}}^0 + \frac{RT}{2F} 2,303 \times \lg \frac{L_{Fe(OH)_2} a_{H^+}^2}{K_B^2} = E_{Fe,Fe^{2+}}^0 + \frac{RT}{2F} 2,303 \times \left( \lg \frac{L_{Fe(OH)_2}}{K_B^2} - 2pH \right); \quad (3.2)$$

де  $L_{Fe(OH)_2} = a_{Fe^{2+}}^2 a_{OH^-}^2$  – добуток розчинності  $Fe(OH)_2$ ;

$a_{OH^-}$  та  $a_{H^+}$  – активність гідроксильних і водневих іонів в при електродному шарі електроліту;



$K_B = a_{OH^-} + a_{H^+}$ —іонний добуток води;

$pH = -\lg a_{H^+}$ — водневий показник у приелектродному шарі електроліту.

При 25°C:  $E_{Fe,Fe^{2+}} = -0,440$  В;  $\frac{RT}{2F} 2,303 = 0,0296$ ;  $L_{Fe(OH)_2} = 1,65 \cdot 10^{-15}$ ;  
 $K_B = 1,008 \cdot 10^{-14}$ . Підставляючи ці значення в рівняння (3.2), знаходимо:

$$\begin{aligned} E_{Fe,Fe^{2+}} &= -0,440 + 0,0296 \left( \lg \frac{1,65 \cdot 10^{-15}}{(1,008 \cdot 10^{-14})^2} - 2pH \right) = \\ &= -(0,050 + 0,0592 pH) \text{ В.} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Таким чином, захисний потенціал сталі є рівним рівноважному потенціалу заліза та залежить від pH електроліту. Якщо у процесі експлуатації сталеві конструкції значення pH залишається постійним у всьому об'ємі електроліту, то відповідне значення захисного потенціалу може бути розраховане за рівнянням (3.3). Для електролітів з pH від pH5,5 до pH10 розрахунок дає значення захисного потенціалу, що коливається в межах від  $-0,38$  до  $-0,64$  В [19-20].

У зв'язку з тим, що рівняння (3.3) містить водневий показник електроліту в приелектродному шарі, який у ряді випадків може відрізнятися від водневого показника решти об'єму електроліту, для розрахунку захисного потенціалу необхідно знати перше значення pH. Положення полегшується тим, що згідно з наявними даними активність водневих іонів в різних водних середовищах, у яких залізо знаходиться у рівновазі з гідроксидом заліза, лежить в інтервалі pH від pH8,3 до pH9,6 у залежності від складу води та інших чинників. Відомо, що продукти корозії заліза в нейтральних електролітах встановлюють постійне значення pH9,5. Тому за відсутності умов для вирівнювання pH електроліту корозія в розчинах з різними (в певних межах) значеннями pH відбувається практично при одній і тій же активності водневих іонів. Цим пояснюється незалежність швидкості корозії заліза від pH розчину в

інтервалі рН4...рН9,6. Очевидно, корозія сталі у відносно стабільному електроліті без перемішування, яким є, наприклад, ґрунт, може бути також віднесена до цього випадку. Теоретичне значення захисного потенціалу сталі в ґрунті (рН8,3...рН9,6) відповідно коливається в межах від  $-0,541$  до  $-0,618$  В, складаючи в середньому  $-0,58$  В по відношенню до стандартного водневого електроду, що знаходиться в хорошій відповідності до дослідних даних [19, 22].

У деяких випадках на поверхні виробів утворюється осад гідроокисів металів, іони яких в достатній кількості містяться в електроліті, а оборотний потенціал заліза фактично визначається їх активністю. Так, наприклад, при катодному захисті в морській воді на поверхні сталевих виробів утворюється осад  $Mg(OH)_2$ . Активність іонів заліза в електроліті можна визначити з рівняння:

$$a_{Fe}^{2+} = a_{Mg}^{2+} \ln \left( (L_{Fe(OH)_2}) / (L_{Mg(OH)_2}) \right) = 0.3 \cdot 10^{-3} a_{Mg}^{2+} \quad (3.4)$$

Захисний потенціал сталі:

$$E_{зах} = E_{Feоб} = E_{Fe}^0 + (RT/2F) \ln (a_{Mg}^{2+} \cdot (L_{Fe(OH)_2}) / (L_{Mg(OH)_2})) \quad (3.5)$$

Після підстановки всіх необхідних значень отримаємо:

$$E_{зах} = -0,44 + 0,0296 \lg a_{Mg}^{2+} \quad (3.6)$$

Різниця між розрахованою величиною захисного потенціалу сталі та початковим (до катодної поляризації) потенціалом сталі в обраному електроліті дає захисну катодну поляризацію. Так, приймаючи потенціал сталі в сухому ґрунті рівним  $E_x = -0,3$ В, отримуємо значення катодного поляризації:

$$\Delta E_K = E_z - E_x = -0,58 - (-0,3) = -0,28 \text{ В}, \quad (3.7)$$

або округлюючи,  $-0,30$  В, при цьому густина захисного струму має бути в межах  $10...30$  мА/м<sup>2</sup>.

Захисний потенціал інших металів і сплавів може бути розрахований аналогічним чином.

Метали схильні до пасивації, як алюміній або нержавіюча сталь, за низьких швидкостей корозії розчиняються рівномірно, а за високих – з утворенням питтингів, тому їх катодний захист забезпечується вже при поляризації до значень більше негативних, ніж критичний потенціал пітінгоутворення. Останній лежить у пасивній області, і його значення тим нижче, чим вище концентрація хлорид-іонів (в 3 відсотковому розчині NaCl його значення для алюмінію складає  $-0,45$  В). Для нержавіючої сталі X18H8 критичний потенціал в 3% розчині NaCl дорівнює  $0,21$  В, а для нікелю – близько  $0,23$  В [23].

### 3.1.2. Критерій повного катодного захисту

Основним критерієм катодного захисту є захисний потенціал. Це потенціал, при якому швидкість розчинення металу приймає гранично низьке значення, допустиме для конкретних умов експлуатації. Металу потрібно надати такий негативний потенціал, за якого його окислення стає термодинамічно малоімовірним [19].

Після тривалої дії катодного струму (від кількох діб до кількох місяців) на металі, який захищають, за рахунок концентраційної поляризації по кисню (а в умовах підземної корозії також за іншими компонентами ґрунтового розчину електроліту, включаючи й воду) відбувається така стабілізація зміщення потенціалу в негативну сторону, що вимикання пристрою поляризації (станції катодного захисту) під час ремонтних робіт або при вимірюванні потенціалу об'єкту, який захищають, не викликає помітної зміни істинного потенціалу, що встановився під дією струму, і він залишається постійним іноді протягом десятків хвилин (у ґрунті) [24].

Для вуглецевої сталі критерієм повного катодного захисту з 1905 р. (Німеччина, м. Дрезден) прийнято вважати потенціал  $E_3 \leq -0,53$  В(н.в.е.),

значення якого вимірюють при відключеному захисному струмі з метою усунення із результатів вимірювання омічних втрат напруги у ґрунті. Даний критерій має повноцінне теоретичне термодинамічне обґрунтування, оскільки наближається до рівноважного потенціалу заліза у водних розчинах електроліту, який розраховується за рівняннями (3.3) і (3.6) з урахуванням найбільш вірогідних властивостей ґрунтів. Цей критерій застосовується при захисті добре ізольованих трубопроводів або трубопроводів під незначним впливом блукаючих струмів за умови відсутності біокорозії під дією анаеробних мікроорганізмів.

Вимірювання потенціалів металевих конструкцій під катодним захистом у ґрунті завжди проводять по відношенню до насиченого мідно–сульфатного електрода (м.с.е.). У мідно–сульфатній шкалі критерій повного катодного захисту сталі становить  $E_3 \leq -0.85 \text{ В(м.с.е.)}$ . За такого потенціалу у більшості корозійних ситуацій сталеві підземні споруди мають бути захищеними щонайменше на 80 %. Однак такий потенціал достатній тільки в разі, коли відсутня анаеробна біокорозія. За наявності останньої захисний потенціал повинен бути більш негативним й становити, за різними даними,  $-0.95 \dots -0.98 \text{ В}$ . Цей потенціал часто називають оптимальним потенціалом катодного захисту, оскільки його підтримання забезпечує повний катодний захист сталі практично у всіх ґрунтах і природних водних середовищах [22].

### **3.1.3. Мідно–сульфатний електрод порівняння**

Конструктивно мідно–сульфатний електрод порівняння являє собою закриту ємність (форма може бути довільною) з полімерного діелектричного матеріалу, одна стінка якого виконана з гідрофільного пористого матеріалу, через яку розчин електроліту сполучається капілярними силами з отчуючим ґрунтом. У ємність заливається

насичений розчин мідного купоросу й додається деяка кількість твердої фази електроліту. Також в розчин занурюється мідний електрод по можливості більшої площі. Такий електрод відрізняється хорошою стабільністю, дешевизною і достатньо низькою похибкою відтворення потенціалу  $\pm 2$  мВ, тобто  $E(\text{м.с.е.}) = 0.320 \pm 0,002 \text{ В(н.в.е.)}$  [20].

Мідно-сульфатний електрод та шкалу потенціалів відносно нього використовують у практиці активного захисту металевих конструкцій у ґрунті у всьому світі. Тому, якщо шкала вимірювання потенціалів не вказана, а контекст стосується катодного захисту підземних металевих конструкцій, то потенціал вимірювали по відношенню до м.с.е.

Конструкція м.с.е. часто передбачає закріплення на одній з його суцільних поверхонь так званого датчика корозійного потенціалу, який являє собою металевий квадрат розміром  $20 \times 20 \times 2$  мм. Матеріалом датчика за замовчуванням є вуглецева сталь, але у певних випадках датчик виготовляють з того ж самого матеріалу, що й металева конструкція, потенціал якої планується контролювати даним пристроєм [20].

### **3.1.4. Практичні критерії катодного захисту**

Окрім основного критерію катодного захисту, наявні і деякі практичні критерії, що базуються на практичних даних та показниках й є більш зручними за певних умов. Нижче наведені деякі з них, що були обрані на основі стандартів національної асоціації інженерів корозіоністів США.

Найпростішим для застосування практичним критерієм є поляризація металевої конструкції на більше ніж 300 мВ у катодний бік ( $-\Delta E \geq 300 \text{ мВ}$ ), тобто, від'ємна зміна потенціалу по відношенню до стаціонарного значення повинні переважати 300 мВ. Потенціали вимірюють при відключеному струмі. За ввімкненого струму, обов'язково

враховуються омичні втрати. Областю застосування даного критерію є захист трубопроводів без сторонніх контактів з іншими металічними конструкціями та без ізоляційних захисних покриттів [20].

Досить простим в реалізації є критерій, що полягає у визначенні зменшення поляризації  $\Delta E$  після відключення захисного струму, яке має становити величину більше 100 мВ ( $\Delta E \geq 100 \text{ мВ}$ ). Його використовують для захисту трубопроводу без будь-якого покриття. Додатковою умовою адекватності такого критерію є негативність всіх градієнтів напруг, перпендикулярних до стінок трубопроводу, що підлягає захисту. Недоліком такого критерію може стати той факт, що після тривалого катодного захисту підземних комунікацій в важких ґрунтах такого зниження потенціалу на 100 мВ необхідно чекати щонайменше кілька десятків хвилин. У випадку захисту трубопроводів в ізоляції або з теплоізоляцією цей час може зрости до неприпустимих для ведення вимірювань величин [20].

Для захисту особливо відповідальних об'єктів, які піддаються значним механічним навантаженням й проходять через середовища зі значною зміною корозійних умов (обсадні колони бурових свердловин і опори морських нафтових платформ) необхідний захисний струм і потенціал визначають зняттям Тафелівських кривих безпосередньо на об'єкті, що захищають, шляхом пробного підводу живлення від потужних потенціостатуючих пристроїв або регульованих джерел постійного струму. Один зі спрощених варіантів такого критерію передбачає визначення на катодній кривій потенціалу появи різкого підйому струму. Цей потенціал і приймають за критерій. Однак такі підйоми можуть відбуватися в деяких середовищах не через повне припинення розчинення металу, а в зв'язку з особливостями відновлення деполаризатора. В інших випадках зміни можуть бути обумовлені концентраційною поляризацією або відчутним

падінням напруги в пухких капілярно–пористих шарах, що оточують метал, який захищають[20].

За наявності впливу блукаючого струму для конструкції неможливо визначити стаціонарний потенціал корозії, а також неможливо адекватно задати потенціал повного катодного захисту, оскільки його величину доводиться контролювати на фоні поляризації блукаючим струмом й омичних втрат, ним викликаних. Існує два поширених методи нівелювати заважаючий вплив блукаючого струму на контроль за потенціалом об'єкту, який захищають. Перший не вимагає додатково земляних й інженерних робіт і полягає у короткочасному переключенні або подвоєнні захисного струму й реєстрації відповідної зміни потенціалу, яку надалі віднімають від потенціалу включення й таким чином досить коректно розраховують шукану величину потенціалу. Другий метод передбачає встановлення у ґрунт контрольного зонду з матеріалу, аналогічного об'єкту, який захищають. Цей зонд електрично сполучають з трубопроводом, який захищають, й використовують для вимірювання потенціалу при виключенні катодного струму. Зонд включає як датчик корозії з матеріалу трубопровода, так і сульфатно–мідний насичений електрод порівняння. У момент електричного відключення такого зонду від трубопровода його датчик корозії, що має вигляд сталльної пластинки розміром  $20 \times 20 \times 2$  мм, на короткий час набуває істинного значення потенціалу матеріалу трубопровода за даних корозійних умов під струмом. Це можливо завдяки дуже повільному падінню концентраційної поляризації у ґрунті, відсутності суттєвого впливу блукаючих струмів на потенціал датчика (його розміри для надто малі, щоб піддаватися дії помітного перепаду напруги у ґрунті), а омичні втрати від дії блукаючих струмів між датчиком корозії і електродом порівняння нікчемні, внаслідок конструктивно зумовленого близького їх розміщення. Такі

зонди використовують також тоді, коли вимір потенціалу за відключення катодного струму неможливий або наявний контакт трубопроводу з залізобетонними конструкціями [24].

### **3.1.5. Максимальний потенціал захисту**

Крім захисного потенціалу, необхідно враховувати і величину максимального допустимого потенціалу на трубопроводі. Занадто велика величина потенціалу може призвести до порушення адгезії захисного бітумного покриття трубопроводу, що знаходиться під катодним захистом, з металом, відшаровування покриття і збільшення витрати струму на захист трубопроводу. Таке явище відбувається внаслідок надмірно швидкого виділення газоподібного водню. Встановлено, що адгезія такої поширеної монтажної ізоляції як бітум до поверхні сталі швидко порушується при потенціалах негативніших ніж  $-0,9$  В у шкалі мідно-сульфатного насиченого електрода (м.с.е.). Відомо, що відшарування бітумних покриттів в умовах водних електролітів спостерігається і при мінімальному захисному потенціал, рівному  $-0,85$  В, коли не створені умови для виділення газоподібного водню в результаті реакції водневої деполяризації. Таке явище можна пояснити тим, що адгезія бітумного покриття до металу виявляється недостатньою, щоб протистояти силі, що діє на межу поділу метал/покриття в результаті скупчення міграційної води. Причиною такого електроосмотичного переміщення води є відносно більша гідратація катіонів порівняно з аніонами [19, 20].

За умови використання сучасних полімерних ізоляційних покриттів захисний потенціал можна знижувати до  $-1.0$  В і нижче. Проте відносно недавно, у 80-х роках ХХ століття, було показано, що знижувати потенціал далі ніж  $-1.1$  В не рекомендується не лише тому, що це супроводжується експоненційним прискоренням кількості виділеного



водню й не додає суттєвого захисного ефекту. Було експериментально встановлено й теоретично підтверджено, що при потенціалах нижче  $-1.1$  В можливе прискорення руйнування сталі внаслідок надмірного збільшення рН приелектродного шару за умови високих температур, які сприяють розвитку корозійного розтріскування. Також можливе механічне руйнування сталі внаслідок критичного зниження міцності під дією наводнення поверхні і всієї товщі металу [22].

На діючих сталевих трубопроводах ізольованих заводською полімерною ізоляцією, які не обладнані спеціальними контрольно-вимірювальними пунктами для вимірювання поляризаційних потенціалів, допускається здійснювати катодну поляризацію таким чином, щоб середнє значення різниці потенціалів знаходилося в таких межах  $-0,9$  до  $-3,5$  В(м.с.е.).

Для металів з амфотерними властивостями, таких як алюміній і свинець, що часто використовуються в підземних комунікаціях, величину максимального захисного потенціалу визначають з урахуванням зниження їх стійкості під дією зростання рН приелектродного шару внаслідок перебігу реакції виділення водню на об'єкті, який захищають [19, 23].

### **3.1.6. Оцінювання ефективності катодного захисту металів**

На практиці ефективність катодного захисту можна визначити декількома способами. За можливості візуального обстеження можна встановити залежність числа й інтенсивності корозійних ушкоджень від часу експлуатації. Для діючого підземного трубопроводу можна зібрати статистику наскрізних руйнувань від часу експлуатації. При захисті кораблів можна через певні інтервали часу обстежити корпус для визначення глибини виразок, що утворилися [23].

Ефективність захисту об'єктів, поверхню яких неможливо обстежити повністю, можливо встановити за допомогою прискорених випробувань за наступними методиками [22-24]:

- Випробування металевого зразка.

Зважений металевий зразок, якому надається форма зовнішньої поверхні об'єкту, який захищають, приєднують до труби за допомогою припаяного контактного дроту. Дріт та повернені одна до одної поверхні зразка і труби покривають кам'яновугільної смолою. Після витримки в ґрунті протягом декількох тижнів або місяців визначають втрату маси ретельно очищеного зразка, яка й служить мірою повноти катодного захисту трубопроводу.

- Колориметричні вимірювання.

Виймають ґрунт на обмеженій площі так, щоб очистити частину поверхні підземного трубопроводу. До зачищеної поверхні металу прикладають квадрат фільтрувального паперу, змоченого в розчині гексаціаноферату калію. Потім поновлюють ізоляцію труби над папером й засипають трубу ґрунтом. Через порівняно короткий час (варто пам'ятати, що лише поновлення капілярних зв'язків навіть в утрамбованому ґрунті вимагає щонайменше дві доби) оглядають папір – блакитний колір внаслідок утворення гексаціаноферату заліза вказує на неповний катодний захист, відсутність блакитного забарвлення свідчить про задовільний захист. Деякі модифікації цього методу можуть дати кількісний результат вимірювання швидкості корозії.

За результатами випробування металевого зразка розраховують величину захисного ефекту  $z$  (%)

$$Z = (K_0 - K_1) / K_0 \cdot 100 \%, \quad (3.8)$$

де  $K_0$  [г/(м<sup>2</sup>·год)] – швидкість корозії металу без захисту,  $K_1$  [г/(м<sup>2</sup>·год)] – швидкість корозії металу в умовах електрохімічного захисту.

### **3.1.7 Устаткування для катодного захисту**

Для апаратурного оформлення катодного захисту необхідні: джерело живлення (станція катодного захисту), що працює в автоматичному режимі, електрод порівняння з стійким значенням потенціалу в умовах експлуатації і анод, що характеризується малою швидкістю розчинення при високій анодній густині струму.

Як електроди порівняння використовують мідно–сульфатні і хлор–срібні електроди. Їх конструкцію вибирають з урахуванням умов експлуатації (грунту, морська вода і т.д.), а число та розміщення – залежно від заданої точності контролю захищеності металевих об'єктів [20].

#### **3.1.7.1 Станції катодного захисту**

Станція катодного захисту (СКЗ) – комплекс обладнання для катодної поляризації металевих об'єктів зовнішнім струмом, що генерує постійний струм або випрямляє змінний і утворює електричний ланцюг між спеціально встановленим у ґрунт або водне середовище анодом і об'єктом захисту [22-23].

До складу СКЗ входять джерело постійного (випрямленого) струму, анодне заземлення, катодний вивід трубопроводу (дренажний кабель) та інші електродні лінії (дроти, кабелі, шини).

Залежно від наявності джерел електропостачання поблизу трубопроводу СКЗ можуть живитися від ліній електропередачі (напругою 0,4, 6 і 10 кВ) і з власним автономним електропостачанням.

На СКЗ з живленням від ліній електропередачі як джерело струму застосовують випрямлячі, а на СКЗ з автономним живленням – вітроелектрогенератори, електрогенератори з двигунами внутрішнього згоряння, термоелектрогенератори і хімічні джерела струму. Станції

катодного захисту за принципом дії поділяються на дві групи: трансформаторні та інверторні.

Інверторні станції поступово витісняють трансформаторні завдяки своїм високим технічним характеристикам і значно більш широким функціональним можливостям. Проте, трансформаторні пристрої випускають і до сьогодні й встановлюють навіть на нових об'єктах електрохімічного захисту.

### 3.1.7.2 Катодна станція нескінченної довжини

Закон розподілу захисного струму довжиною ділянки трубопроводу залежить від розташування об'єкта, що захищають, і місця встановлення анодного заземлення. Якщо на лінії трубопроводу розташована одна установка катодного захисту і ділянка, що підлягає захисту, не від'єднана електрично від решти лінії, то розподіл потенціалу вздовж трубопроводу має вигляд, показаний на рис. 3.2. Такі ділянки захисту зводяться ділянками нескінченної довжини, а катодні станції для цих ділянок – станції нескінченної довжини [22].

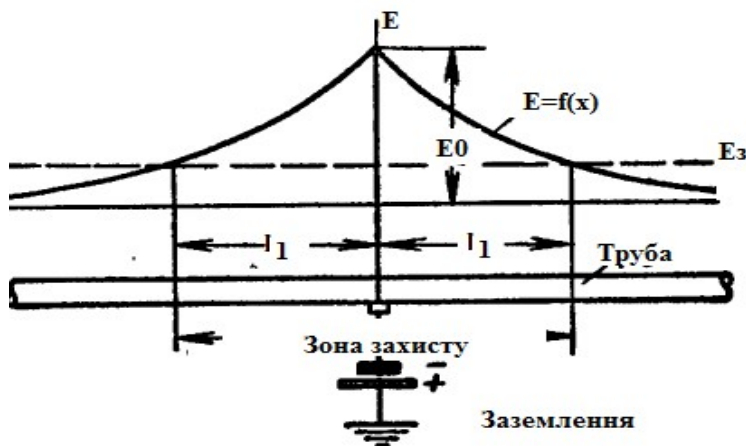


Рис.3.2. Схема розподілу потенціалу вздовж трубопроводу під захистом станції нескінченної довжини.

Значення катодної поляризації знижуються від максимального значення  $E_0$  (близько анодного заземлення) до мінімального захисного значення  $E_3$  й продовжує зменшуватися і далі за межами захищеної ділянки, наближаючись асимптотично до нульового значення в нескінченно віддалених точках.

Сила струму на відстані  $x$  від точки дренажу визначається наступним рівнянням [22]:

$$I = I_0 e^{-x \sqrt{\frac{R_m}{R_n}}}, \quad (3.9)$$

де  $I$  – сила струму в точці  $x$ , А;

$I_0$  – сила струму в точці дренажу, А;

$x$  – відстань від точки дренажу, м;

$R_m$  – електричний опір металу трубопроводу довжиною 1 м, Ом/м;

$R_n$  – електричний опір ізолюючого захисного покриття трубопроводу довжиною 1 м, Ом·м.

Катодна поляризація на відстані  $x$  від точки дренажу визначається наступним рівнянням:

$$E = E_0 e^{-x \sqrt{\frac{R_m}{R_n}}}, \quad (3.10)$$

де  $E$  – поляризація у точці  $x$ , В;

$E_0$  – поляризація в точці дренажу, В.

Ефективний опір ділянки трубопроводу (одного плеча) визначається наступним рівнянням:

$$R = \frac{E_0}{I_0} = \sqrt{R_m R_n}, \quad (3.11)$$

де  $R$  – ефективний опір ділянки трубопроводу, Ом.

Електричний опір всієї ділянки трубопроводу, що захищають,  $R_{\text{мр}}$ , Ом визначається за формулою:

$$R_{mp} = \frac{R}{2} \quad (3.12)$$

Необхідна поляризація в точці дренажу може бути розрахована за рівнянням:

$$E_0 = E_3 e^{l_1 \sqrt{\frac{R_m}{R_n}}} \quad (3.13)$$

де  $E_3$  – поляризація захисту;

$l_1 = \frac{L_1}{2}$  – половина довжини ділянки трубопроводу, що захищають.

Струм у точці дренажу розраховується за рівнянням:

$$I_0 = \frac{E_3}{\sqrt{R_m R_n}} e^{l_1 \sqrt{\frac{R_m}{R_n}}} \quad (3.14)$$

Струм катодної станції

$$I_3 = \frac{E_0}{R_{mp}} \text{ або } I_3 = 2I_0 \quad (3.15)$$

Ширина зони захисту катодної станції з певними параметрами

$$l_1 = \frac{\ln \frac{E_0}{E_3}}{\sqrt{\frac{R_m}{R_n}}} \text{ або } l_1 = \frac{\ln \left( \frac{I_0 \sqrt{R_m R_n}}{E_3} \right)}{\sqrt{\frac{R_m}{R_n}}} \quad (3.16)$$

### 3.1.7.3. Катодна станція кінцевої довжини

Якщо на лінії трубопроводу, що захищають, розташовано кілька установок катодного захисту, кожна з яких впливає на розподіл потенціалу сусідньої станції, то розподіл потенціалу вздовж трубопроводу має вигляд, показаний на рис. 3.3. Такі ділянки захисту називають ділянками кінцевої довжини, а катодні станції для цих ділянок – станціями кінцевої довжини. Значення катодної поляризації, знижуючись від максимального значення  $E_0$  (навпроти анодного заземлення) до мінімального захисного значення  $E_3$ , знову підвищується до максимального значення навпроти заземлення сусідньої станції. Так як частина струму однієї станції витісняється як би назад струмом сусідньої станції (видно з порівняння  $l_2 > l_1$  на рис. 3.3), то

для станції кінцевої довжини к.к.д. катодного захисту виходить більшим, ніж для станції нескінченної довжини [26].

Необхідна поляризація в точці дренажу може бути розрахована за рівнянням [23]

$$E'_0 = E_3 \operatorname{ch}(l_2 \sqrt{\frac{R_m}{R_n}}), \quad (3.17)$$

де  $E'_0$  — поляризація в точці дренажу, В;

$E_3$  — поляризація захисту, В;

$\operatorname{ch} x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$  — гіперболічний косинус;

$l_2 = \frac{L_2}{2}$  — половина довжини ділянки трубопроводу, котрий захищають;

$x$  — відстань від точки дренажу, м;

$R_m$  — електричний опір металу трубопроводу довжиною, Ом/м;

$R_n$  — електричний опір ізолюючого покриття трубопроводу, Ом·м.

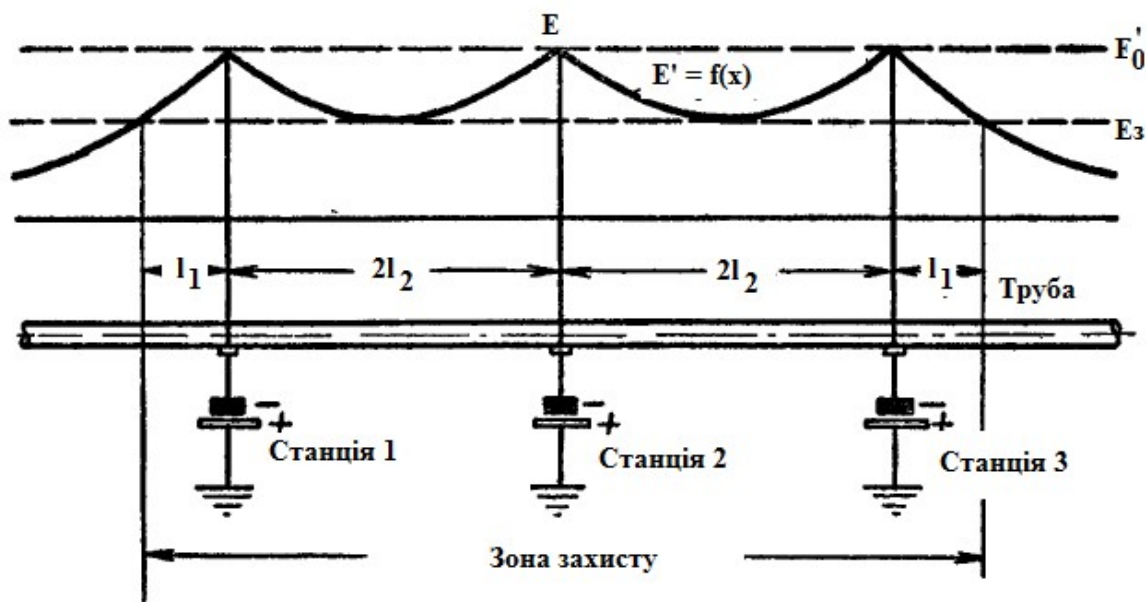


Рис.3.3. Схема розподілу потенціалу вздовж трубопроводу під захистом станцій кінцевої довжини

Ефективний електричний опір ділянки трубопроводу (однієї сторони) визначається за наступним рівнянням:

$$R' = \frac{E'_0}{I'_0} = \frac{\sqrt{R_m R_n}}{\text{th}(l_2 \sqrt{\frac{R_m}{R_n}})} \quad (3.18)$$

де  $R'$  – ефективний опір ділянки трубопроводу, Ом;

$I'_0$  – сила струму в точці дренажу, А;

$\text{th } x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$  – гіперболічний тангенс.

Електролітичний опір всієї ділянки трубопроводу, котру захищають  $R'_{\text{мп}}$ , Ом визначається за формулою:

$$R'_{\text{мп}} = \frac{R'}{2} \quad (3.19)$$

Струм джерела проміжних станцій захисту

$$I'_3 = \frac{E'_0}{R'_{\text{мп}}} \text{ або } I_3 = 2I'_0 \quad (3.20)$$

де  $I'_3$  – струм джерела проміжної станції захисту, А.

Ширина зони захисту станцією з певними параметрами

$$l_2 = \frac{\text{arc ch} \frac{E_0}{E_3}}{\sqrt{\frac{R_m}{R_n}}} \text{ або } l_2 = \frac{\text{arc sh}(\frac{I'_0 \sqrt{R_m R_n}}{E_3})}{\sqrt{\frac{R_m}{R_n}}} \quad (3.21)$$

Якщо крайні ділянки трубопроводу, які підлягають захисту, не від'єднанні від решти лінії, то вони розраховуються як ділянки нескінченної довжини.

Струм джерела крайніх станцій захисту:

$$I''_3 = I_0 + I'_0 \quad (3.22)$$

де  $I''_3$  – струм джерела крайньої станції захисту, А;

$I_0$  – струм в точці дренажу для ділянки нескінченної довжини, А;

$I'_0$  – струм в точці дренажу для ділянки кінцевої довжини, А.

Опір всієї крайньої ділянки трубопроводу, котру захищають, визначається за формулою:

$$R''_{\text{мп}} = \frac{R R'}{R + R'} \quad (3.23)$$

де  $R''_{\text{мп}}$  – електричний опір всієї крайньої ділянки трубопроводу, Ом;



$R$  – електричний опір ділянки нескінченної довжини, Ом;

$R'$  – електричний опір ділянки кінцевої довжини, Ом.

#### 3.1.7.4. Анодне заземлення

Допоміжний електрод, який поляризується анодно при катодному захисті зовнішнім струмом, є одним з відповідальних елементів захисної системи, так як головні втрати потужності у всій катодній установці (орієнтовно 70 %) припадають зазвичай на нього. Як матеріал для анодного заземлення використовуються залізо, сталь, чавун, вугілля, кокс і графіт. Найчастіше застосовують анодне заземлення зі сталевого брухту, наприклад, старих труб. Іноді знаходять застосування комбіновані заземлення зі сталі та вугілля [26].

За конструкцією анодні заземлення можуть бути: точковими (одиначний анод, з'єднаний з джерелом постійного струму), розподіленими (система анодів, розташованих уздовж захищуваного трубопроводу, по певній геометричній схемі) або безперервними (заземлення, розташоване паралельно захищуваній ділянці трубопроводу і не має розривів по всій довжині) (рис. 3.4)

Трубчасті та інші протяжні заземлення можуть бути трьох типів: горизонтальні, вертикальні і комбіновані (рис.3.5). Найчастіше застосовуються комбіновані заземлення.

Необхідна вага металу анодного заземлення може бути визначена за формулою [22]:

$$g = kg_i \tau I_z \quad (3.24)$$

де  $g$  – необхідна вага металу анодного заземлення, кг;

$g_i$  – середня вага металу, що окиснюється з анодного заземлення струмом силою 1 А протягом 1 року (для заліза  $g_i = 9,1$  кг);

$\tau$  – час, на який розраховується робота анодного заземлення, роки;

$I_3$  – струм джерела живлення катодної станції, А;

$k$  – коефіцієнт запасу для забезпечення нормальної роботи анодного заземлення на весь проектований термін його експлуатації [20].

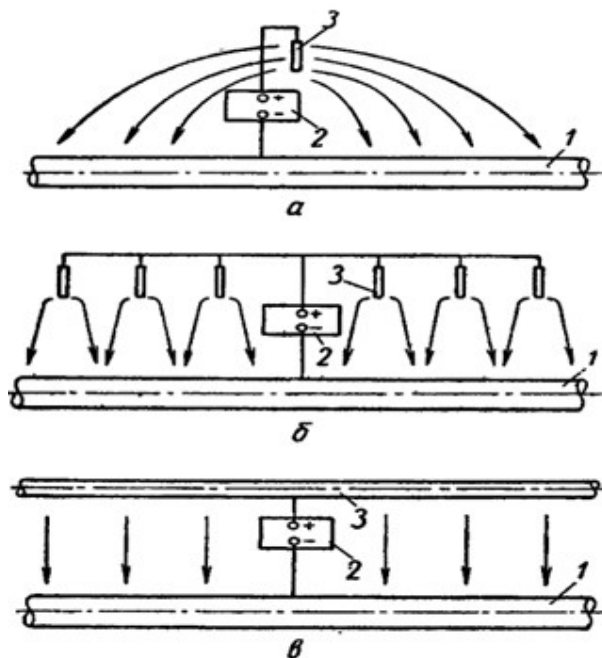


Рис.3.4. Конструкції анодного заземлення:

$a$  – точковий анод;  $b$  – розподілений анод;  $в$  – безперервний анод;

$1$  – трубопровід;  $2$  – катодна станція;  $3$  – анодне заземлення

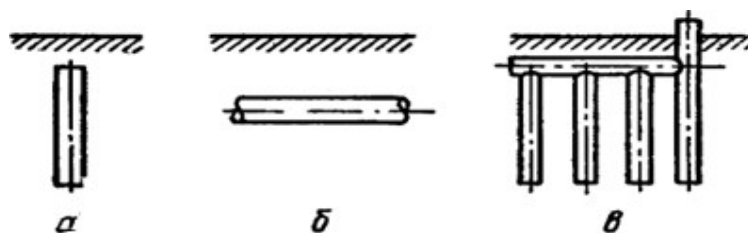


Рис.3.5. Типи протяжних анодних заземлень:

$a$  – вертикальний;  $b$  – горизонтальний;  $в$  – комбінований

Загальну довжину анодного заземлення з труб можна розрахувати за формулою [23]:

$$L_a = \frac{g}{0,785(d_H^2 - d_B^2)\gamma}, \quad (3.25)$$

де  $L_a$  – загальна довжина заготовки анодного заземлення з труб, м;

$g$  – вага металу анодного заземлення, кг;

$d_H$  – зовнішній діаметр труби анодного заземлення, м;

$d_B$  – внутрішній діаметр труби анодного заземлення, м;

$\gamma$  – питома вага металу труби, кг / м<sup>3</sup>.

На практиці для анодного заземлення використовують труби діаметром від 5 до 20 см. При меншому діаметрі труби створюються труднощі при їх забиванні у ґрунт. Подальше збільшення діаметра труб незначно зменшує опір розтіканню анодного струму, але надмірно ускладнює монтаж. Горизонтальний заземлювач працює в однакових ґрунтових умовах по всій своїй довжині. Його опір може змінюватися тільки в залежності від зміни опору навколишнього ґрунту. Опір вертикального заземлення суттєво змінюється по довжині. Найбільш помітно опір вертикального заземлення зменшується при збільшенні довжини до 3–4 м. Подальше збільшення довжини заземлення знижує опір порівняно мало [26].

Найбільші труднощі викликає розрахунок опору розтікання анодів  $R_a$  – опір, який чинить ґрунт розтіканню струму від поверхні анода далі у землю.  $R_a$  залежить від характеру розподілу струму в землі, який, в свою чергу, визначається конфігурацією заземлювачів. Тому умовно в практичних цілях відносять опір, який чинить земля розтіканню, до самого анода і називають його опором розтікання анодного заземлення.

Опір розтіканню одиночного вертикального анода виготовленого з труби (рис.3.6) розраховується при  $l \gg d/2$  за формулою [22]:

$$R_a = \frac{\rho_3}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d_n}, \quad (3.26)$$

де  $R_a$  – опір розтіканню анодного заземлення, Ом;

$\rho_3$  – питомий опір ґрунту, Ом·м;

$l$  – довжина анода (труби, зануреної в землю), м;

$d_n$  – зовнішній діаметр труби анодного заземлення, м;

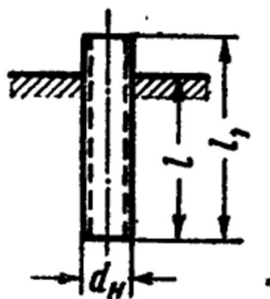


Рис.3.6. Одиночний вертикальний анод виготовлений із труби

Урахування впливу підсолення ґрунту на зменшення опору розтікання анодного заземлення може бути проведений за формулою:

$$R'_a = \frac{R_a}{k}, \quad (3.27)$$

де  $R'_a$  – опір розтікання анодного заземлення після підсолення ґрунту, Ом;

$R_a$  – опір розтікання анодного заземлення до підсолення ґрунту, Ом;

$k$  – коефіцієнт підсолювання [23].

Урахування впливу промерзання ґрунту на збільшення опору розтікання анодного заземлення може бути проведений за формулою:

$$R''_a = R'_a k_{np}, \quad (3.28)$$

де  $R''_a$  – опір розтіканню анодного заземлення з урахуванням впливу промерзання ґрунту, Ом;

$R'_a$  – опір розтіканню анодного заземлення без урахування впливу промерзання ґрунту, Ом;

$k_{np}$  – коефіцієнт промерзання.

При розташуванні у ряд декількох вертикальних заземлювачів кожен з них в тій чи іншій мірі екранує, тобто, впливає на опір розтіканню сусіднього заземлювача. Опір анодного заземлення, що складається з ряду паралельно з'єднаних вертикальних труб, визначається за формулою [24]:

$$R_B'' = \frac{R_a''}{n \eta_u}, \quad (3.29)$$

де  $R_B''$  – загальний опір всіх вертикальних заземлювачів, Ом;

$R_a''$  – опір одного вертикального заземлювача, Ом;

$n$  – кількість заземлювачів;

$\eta_u$  – коефіцієнт використання.

Опір розтіканню горизонтальної сполучної магістралі анодного заземлення визначається за формулою

$$R_M = \frac{0,366 \rho_3}{l} \left( \lg \frac{l^2}{td_n} + 0,301 \right), \quad (3.30)$$

де  $R_M$  – опір розтіканню горизонтальної сполучної магістралі анодного заземлення, Ом;

$\rho_3$  – питомий опір ґрунту, Ом·м;

$l$  – загальна довжина сполучної магістралі, м;

$t$  – глибина залягання центру ваги магістралі, м;

$d_n$  – зовнішній діаметр труби магістралі, м.

Урахування впливу промерзання ґрунту на збільшення опору розтікання сполучної магістралі анодного заземлення може бути проведений за формулою

$$R_M' = R_M k_{np}, \quad (3.31)$$

де  $R_M'$  – опір розтіканню сполучної магістралі анодного заземлення з урахуванням впливу промерзання ґрунту, Ом;

$R_M$  – те ж без урахування впливу промерзання ґрунту, Ом;

$k_{np}$  – коефіцієнт промерзання.

Збільшення опору горизонтальної магістралі внаслідок екрануючого впливу вертикальних заземлювачів розраховується за формулою [24]:

$$R_M'' = \frac{R_M'}{\eta_M}, \quad (3.32)$$

де  $R_M''$  – опір розтіканню горизонтальній сполучної магістралі з урахуванням екранування її вертикальними трубами, Ом;

$R_M'$  – те ж без урахування екранування, Ом;

$\eta_M$  – коефіцієнт використання магістралі.

Сумарний опір розтіканню анодного заземлення катодного захисту  $R_c$ , Ом розраховується за формулою [22]:

$$R_c = \frac{1}{\frac{1}{R_B''} + \frac{1}{R_M''}}, \quad (3.33)$$

Падіння напруги в анодному заземленні може бути розраховане за рівнянням:

$$E_a = I_3 R_c, \quad (3.34)$$

де  $E_a$  – падіння напруги в анодному заземленні, В;

$I_3$  – струм джерела живлення катодної захисної станції, А;

$R_c$  – сумарний опір розтіканню анодного заземлення, Ом.

### 3.1.8. Контроль за роботою та обслуговування катодних станцій

Контроль роботи станцій катодного захисту полягає у періодичному технічному огляді та обслуговуванні установок (не рідше двох разів на місяць), перевірці ефективності їх роботи, а також у вимірі потенціалів споруда–грунт на контрольно–вимірювальних пунктах (колонках), які

встановлюються через кожні 1000 м по трасі трубопроводу, а також по обидва боки переходу трубопроводу через водні перешкоди, автомобільні дороги й залізничні шляхи.

Ефективність роботи установок електрохімічного захисту перевіряють не рідше чотирьох разів на рік кожного сезону, а також при кожній зміні режиму роботи установок і зміни, пов'язаної з розвитком мережі підземних металевих споруд і джерел блукаючих струмів. Стан перемичок при спільному захисті декількох підземних споруд перевіряють, визначаючи їх омичний опір.

При виявленні недостатньої ефективності захисту (скорочення ширини зони захисту) або перевищенні максимально допустимих потенціалів споруда–грунт необхідно провести регулювання режиму роботи СКЗ [25].

Опір розтікання струму з анодного заземлення слід вимірювати не рідше одного разу на рік та у всіх випадках, коли режим роботи катодної станції різко змінюється. Значення опору розтікання струму з анодного заземлення повинно відповідати значенням, зазначеним в акті прийому до експлуатації катодної установки. Вимірювання проводять в період найменшої провідності ґрунту.

Опір контуру захисного заземлення електроустановок вимірюють не рідше одного разу на рік [25].

### **3.2. Протекторний захист металів від корозії**

Згідно із законами електрохімії катодний захист металевої конструкції забезпечується за умови надання їй відповідного захисного потенціалу безвідносно до того, яким способом проводилася катодна поляризація – завдяки зовнішньому джерелу живлення, як у катодному захисті з підрозділом 3.1, чи від різниці корозійних потенціалів об'єкту,

що захищають, і жертвеного анода, як у протекторному захисті. Потенціал такого анода, з огляду на те, що система протекторного захисту є фактично хімічним джерелом струму, має бути від'ємніше потенціалу об'єкту, що підлягає захисту, на величину, яка відповідає одному з критеріїв катодного захисту. При цьому варто пам'ятати, що назвати такий анодний матеріал “більш електронегативним” ніж металевий об'єкт, що підлягає захисту, абсолютно некоректно! З т.зр. електронегативності по Полінгу такий метал анода є менш електронегативним, ніж метал об'єкту захисту, оскільки виявляє меншу спорідненість до електронів, ніж останній й віддає їх для ведення катодного процесу на об'єкті захисту, а сам при цьому окислюється [19].

Внаслідок різниці потенціалів між анодом, який називають протектором, і конструкцією, по провіднику, що їх з'єднує, проходитиме електричний струм від об'єкта, що захищають, до анода (в оберненому до електронів напрямку). Електроенергія в цьому елементі буде генеруватися за рахунок витрати активного матеріалу протектора та деполяризатора катодного процесу, який відновлюватиметься на об'єкті захисту.

Вибір щодо типу джерела енергії катодного захисту (від зовнішнього джерела живлення або від жертвеного анода) спершу проводять з огляду на загальні рекомендації щодо застосування протекторного захисту. Ці рекомендації базуються на природі використовуваних анодних матеріалів. Так для захисту від підземної корозії найчастіше використовують магнієві протектори й зрідка цинкові. З огляду на малу різницю корозійного потенціалу цинкового анода й катодно захищеної сталі (до  $-200$  мВ), цинкові протектори категорично не рекомендується встановлювати у ґрунтах з питомим опором вище  $20$  Ом·м. Магнієві протектори можна ефективно використовувати в ґрунтах з питомим опором до  $50$  Ом·м. При більших опорах ґрунту



протектори розміщують безпосередньо на захищуваній поверхні. Детальніше провести кількісну оцінку доцільності застосування катодного чи протекторного захисту можна за діаграмою з рис. 3.7, за яким зона ефективності протекторного захисту відповідає в середньому низьким струмам, що розтікаються з анода, за умови низького питомого опору ґрунту. Площа протектора повинна складати 0,2 – 0,5% від площі конструкції, яку захищають [20].

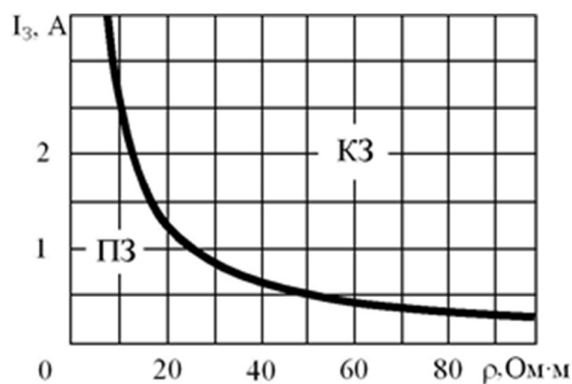


Рис.3.7. Економічна доцільність використання магнієвих анодів (ПЗ) і анодного заземлення із зовнішнім джерелом живлення

Як протектори використовують сплави на основі магнію чи алюмінію, рідше – цинку. Протектори є портативними джерелами електроенергії й особливо корисні за наявності труднощів з подачею електроенергії чи коли споруджувати спеціальну лінію електропередачі економічно недоцільно.

Розглянемо кородуючу систему як бінарний короткозамкнений гальванічний елемент (К–А на рис.3.8), до якого додається третій електрод (Zn), що є в даному випадку найбільш ефективним анодом (протектором). На рис. 3.9 зображена еквівалентна трьохелектродна модель, а на рис. 3.10 – схеми катодного захисту протектором і від зовнішнього джерела [21].

Завдяки роботі корозійного гальванічного елемента сталь не руйнується, оскільки спостерігається розчинення протектора:

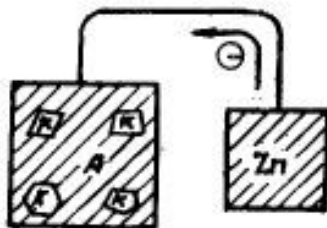
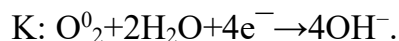
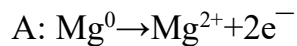


Рис.3.8. Контакт метала (К–А), що кородує за механізмом мікрогальванічних пар, з анодом Zn.

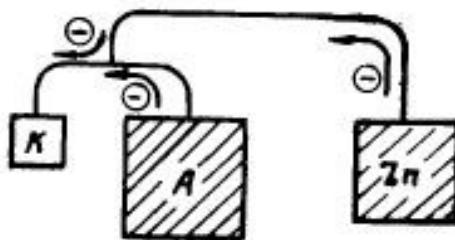


Рис.3.9. Еквівалентна трьохелектродна модель захисного ефекту.

При стандартних потенціалах  $\epsilon_{\text{Mg}^{2+}/\text{Mg}}^0 = -2,34\text{В}$  і  $\epsilon_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}^0 = -0,44\text{В}$  різниця потенціалів розімкненого ланцюга магнію і сталі складає приблизно 1 В (у морській воді магній має  $E_C = -1,3\text{ В}$ ), тому одним анодом може бути захищена лише обмежена ділянка трубопроводу, особливо в ґрунтах з високим питомим опором. Така незначна різниця потенціалів інколи має переваги перед більш високою прикладеною напругою, оскільки зменшує небезпеку «перезахисту» деяких частин системи. При цьому сумарний струм, що протікає через анод, є невеликим,

і зменшується вірогідність руйнування блукаючими струмами металічних конструкцій, що знаходяться поблизу [22].

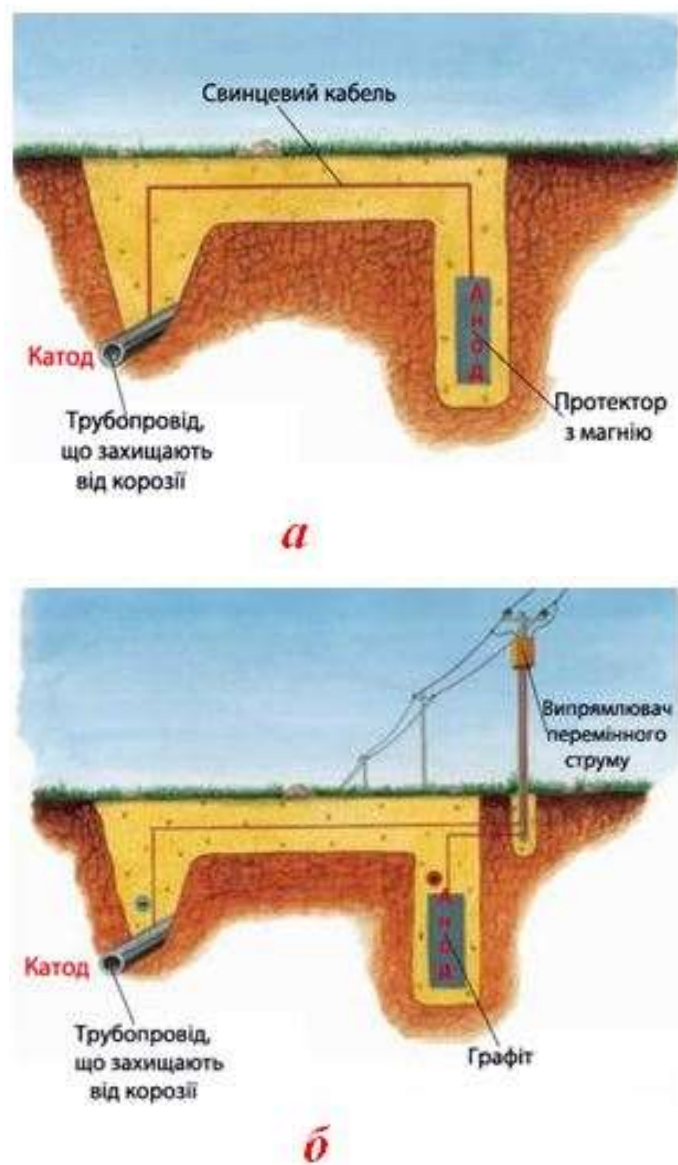


Рис.3.10. Катодний захист металевих конструкцій: *а*– протекторний захист; *б*– захист зовнішнім струмом.

Протектори застосовують для захисту апаратури зі сталі, що застосовується у морській воді, розчинах солей тощо, наприклад, при захисті холодильного обладнання, суден, котлів, апаратів хімічної

промисловості, сховищ нафти тощо. Конструкції зі сталі й чавуну захищають з використанням протекторів з магнію, цинку, і ряду сплавів. При приєднанні протектора необхідно забезпечити постійний контакт його з конструкцією, доступність для огляду, очистки і заміни [23].

Загалом активний захист від корозії протекторами рекомендується поєднувати з використанням захисних лакофарбових покриттів, що дозволяє значно знизити витрати струму, а отже, і витрати протекторного сплаву, таким чином, збільшуючи термін служби протекторного захисту.

### **3.2.1. Матеріали для систем протекторного захисту**

У більшості випадків від корозії захищають вироби, виготовлені з вуглецевої чи низьколегованої сталі. Оптимальний для них потенціал захисту може бути досягнутий в реальних умовах при використанні протекторів, виготовлених з цинку, алюмінію, магнію. Для матеріалів з більш додатніми захисними потенціалами (наприклад, високолеговані сталі, сплави міді, нікелю чи олова) слід застосовувати протектори із заліза чи активованого свинцю [22].

Протектори виготовляють не з чистих металів, а зі сплавів. Деякі легуючі елементи призначені для отримання дрібнозернистої структури протектора, що сприяє більш рівномірному їх окисненню. Інші – для зменшення власної корозії (розчинності) протектора, а отже, для збільшення струмовіддачі. Треті – для зменшення чи запобігання схильності протектора до пасивації, що послаблює його захисну дію.

Здатність до пасивації протекторів повинна бути якомога меншою. Метали, що використовують як протектори, утворюють ряд важкорозчинних сполук, в числі яких можуть бути основи, оксогідрати, оксиди, карбонати, фосфати і різноманітні основні солі. При використанні протекторів в хімічній апаратурі необхідно враховувати, що можуть

утворюватися й інші важкорозчинні сполуки. Перераховані вище сполуки на протекторах, які функціонують зазвичай не утворюються через зниження значення рН в результаті гідролізу, у той час як на катоді відбувається підлугування. Якщо протектор (анод) мало навантажений чи концентрація іонів, що заважають, досить велика, то важкорозчинні сполуки можуть утворюватися і на аноді. Деякі з них утворюються м'якими і пористими і не порушують нормальної роботи протектору, інші – утворюються щільними і твердими, як емалі. Вони повністю блокують поверхню, порушуючи здатність до роботи анода [20].

Іншою важливою властивою характеристикою протектора як анода є його електрохімічний еквівалент. Цей показник називається струмовіддачею. Він буде тим вищий, чим менша атомна маса і вища валентність металу протектору. Для оцінки практичної придатності теоретична струмовіддача сама по собі не є визначальною, оскільки під анодною поляризацією більшість матеріалів протекторів забезпечує струмовіддачу, яка менше теоретичної. Різниця між теоретичною і фактичною струмовіддачею (вихід за струмом) відповідає власній корозії самого матеріалу протектору. Її причиною є перебіг відновлення деполаризаторів у катодних процесах безпосередньо на металі протектора.

У табл.3.1 наведено основні марки сплавів, які використовуються як протектори та їх склад [23].

*Таблиця 3.1. Марки протекторних сплавів*

Марка сплаву	Основні компоненти, %								Домішки не більше, %				
	Al	Zn	Mn	Cu	Hg	Sn	Ti	Mg	Fe	Cu	Ni	Pb	Si
МП-1	5–7	2–4	<0,5	–	–	–	<0,04	Решта	0,3	0,004	0,001	–	0,04
АП-3	Решта	4–6	–	–	–	–	–	–	0,1	0,01	–	–	0,1
АП-4	Решта	4–6	–	–	–	0,05	–	0,5–1	0,1	0,01	–	–	0,1
ЦП-1	0,4–0,6	Решта	–	–	–	–	–	–	0,001	0,001	–	0,005	–
ЦП-2	0,5–0,7	Решта	–	–	–	–	–	0,1–0,3	0,004	0,001	–	0,005	–
ЦП-3	0,2–0,6	Решта	–	–	0,1	–	–	–	0,005	0,001	–	0,005	–
МцП-1	1–2	–	решта	2–3	–	–	–	–	0,5	–	–	–	0,5

Особливості під'єднання протекторів та їх зовнішній вигляд показані на рис.3.11–3.15.



*Рис.3.11.* Спосіб під'єднання протектора до трубопроводу зварюванням



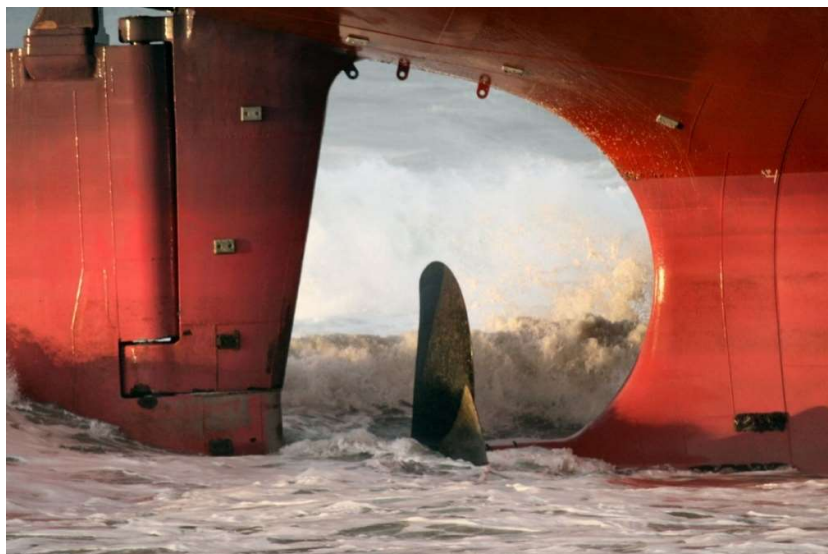
*Рис.3.12.* Протектори для корпусів суден



*Рис.3.13.* Магнієві протектори



*Рис.3.14.* Алюмінієвий протектор



*Рис.3.15. Розміщення протекторів на корпусі корабля*

### **3.2.2. Переваги і недоліки протекторного захисту**

Переваги протекторного захисту металевих поверхонь найбільш повно реалізуються за умов [21]:

- якщо підприємству не вистачає ресурсів, щоб забезпечити застосування більш енерговитратних методик;
- якщо необхідно захистити малогабаритні конструкції;
- якщо потрібен захист металевих виробів і об'єктів, поверхні яких покриті ізоляційними матеріалами.
- Використання певних протекторних сплавів доцільне:
  - алюмінієвих – для захисту конструкції і споруди в морській воді, на прибережному шельфі;
  - магнієвих – для слабоелектропровідних середовищ, де алюмінієві або цинкові протектори показують низьку ефективність; не можна використовувати, якщо потрібно захистити внутрішні поверхні танкерів, резервуарів, відстійників для нафти, так як магнієві протектори відрізняються підвищеною вибухо- і пожежонебезпекою; ідеальні для

захисту зовнішньої поверхні конструкцій, які експлуатуються у прісній воді;

- цинкових— на будь-яких об'єктах, навіть якщо на них високий рівень пожежної небезпеки завдяки пожежобезпечності таких сплавів.
- Конструктивні переваги протекторного захисту:
- відсутність джерела постійного струму;
- можливість застосування одиночних або групових установках з урахуванням особливостей проектного або вже збудованого об'єкта;
- можливість застосування у ґрунті в морських умовах в місцях надто віддалених від джерел електричного живлення.
- Недоліком протекторного захисту є:
- відносно дорога електроенергія, що постачається за рахунок анодного розчинення протектора;
- різке погіршення умов роботи протекторів при збільшенні питомого опору капілярно-пористого середовища, в якому вони встановлюються;
- обмежений термін служби протектора, порівняно з терміном служби сучасних анодних заземлювачів катодного захисту від зовнішнього джерела живлення, внаслідок чого доводиться частіше проводити складні й вартісні процедури заміни протекторів у ґрунті, під водою або у сухих доках, що вимагає значних витрат людино-годин і палива та збільшення штату персоналу певної кваліфікації й кількості відповідного обладнання.

### **3.2.3. Технічні засоби протекторного захисту**

Технічна реалізація протекторного захисту спирається на забезпечення оптимального функціонування протекторів, що разом з об'єстом захисту створюють великий електрохімічний елемент. Оскільки енерговіддача такого елемента з одним анодом невелика, то



частіше доводиться створювати не один, а кілька розташованих поруч подібних елементів (рис.3.16) [19].

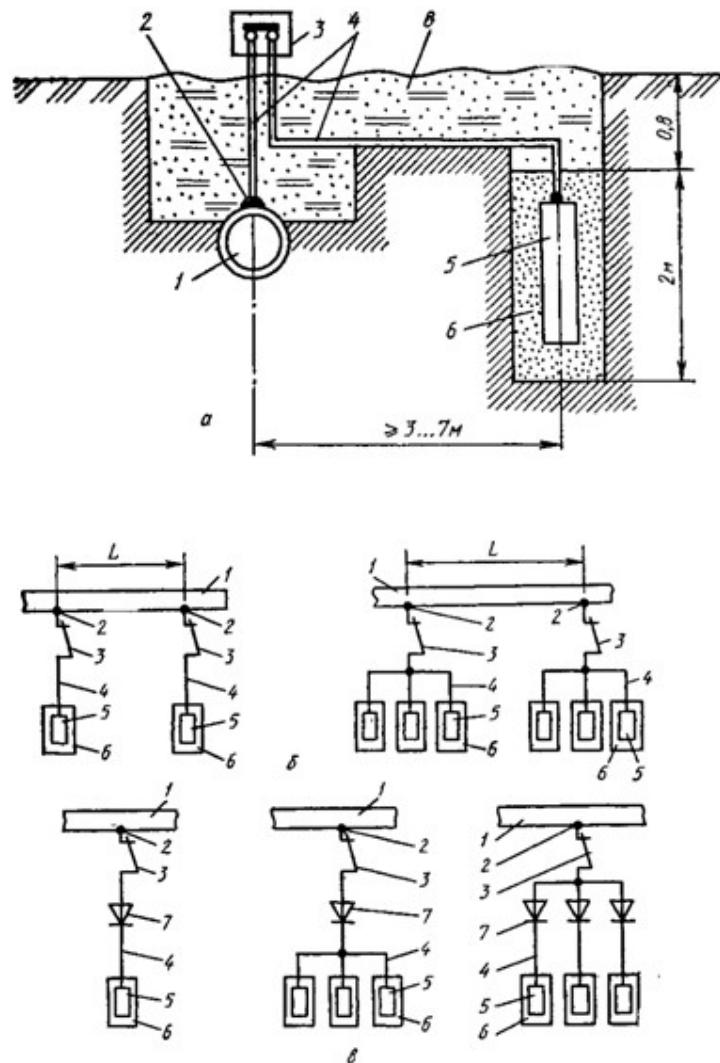


Рис.3.16. Установка протекторного захисту:

а – поодинокі; б – захист протяжних споруд поодинокими і груповими протекторними установками; в – підключення поодинокі і групових поляризованих протекторів із загальним і окремими діодами:

- 1 – об'єкт захисту; 2 – місце дренажу; 3 – пункт контролю; 4 – кабель;  
5 – протектор; 6 – активатор; 7 – діод; 8 – насипний ґрунт.

Найбільш поширені магнієві протектори, що випускаються промисловістю для захисту підземних споруд типу ПМ зображені на рис.3.17 [20].

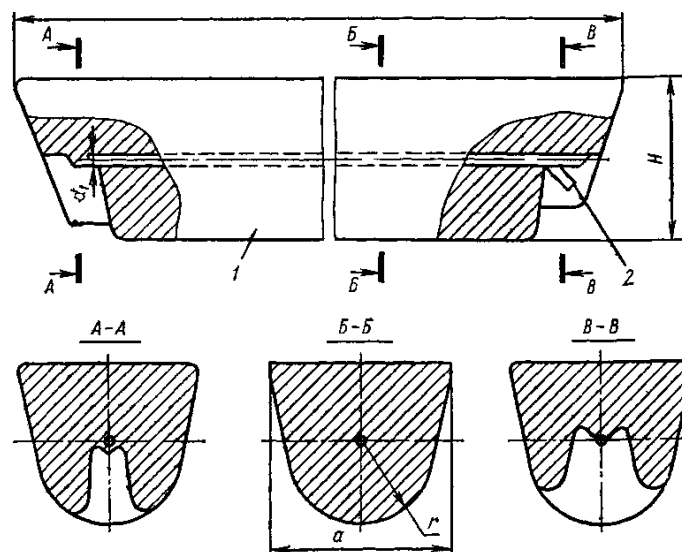


Рис.3.17. Конструкція магнієвих анодів типу ПМ

1 — магнієвий анод; 2 — контактний сердечник

Аноди виготовляють із магнієвого сплаву марки МПУ та МПУ–вч (магнієвий протекторний універсальний і магнієвий протекторний високої чистоти). Всередині анода розміщений контактний сталевий сердечник для підключення дренажного кабелю до протектору. За умови невеликих струмів для підключення зазвичай використовують дріт з площею перетину по міді  $2,5 \text{ мм}^2$  в ізоляції, придатній для підземних умов.

Комплектні протектори з активатором типу ПМ5У, ПМ10У, ПМ20У являють собою магнієві аноди, упаковані в бавовняні мішки разом з порошкоподібним активатором (рис. 3.18). Активатор – це суміш солей, в яку поміщають анод з метою підвищення ефективності протекторної установки. За наявності активатора знижується власна корозія анода, знижується його схильність до поляризації, знижується опір розтікання струму анода, усуваються причини пасивації поверхні протектора. Загалом,

активатор забезпечує стабільний в часі струм у ланцюзі протектор–спорууда та збільшує коефіцієнта корисної дії (термін служби) протектора.

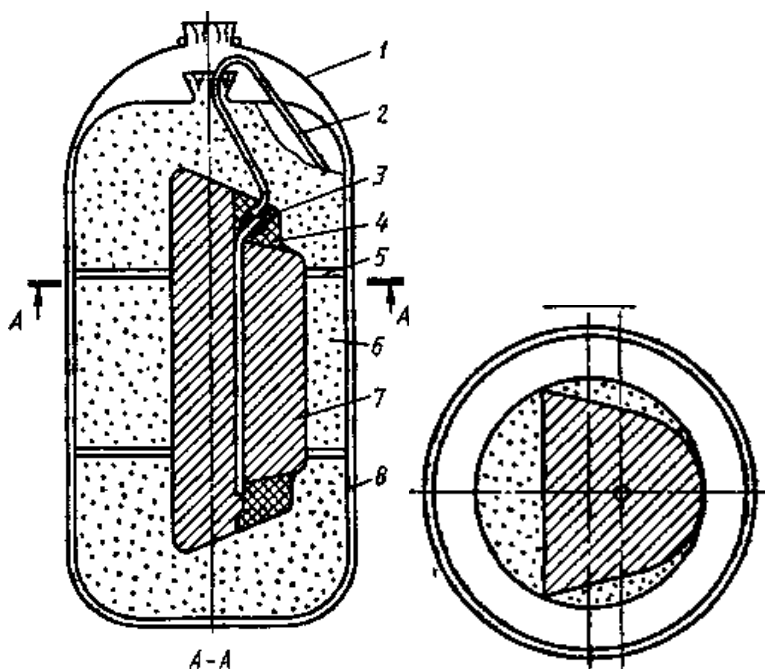


Рис.3.18. Загальний вигляд протектора з активатором:

- 1 – паперовий мішок; 2 – ізолюваний провідник марки ПСРП; 3 – електроізоляційна стрічка, 4 – бітумно–гумова мастика, 5 – картонна (фанерна) шайба; 6 – активатор, 7 – магнієвий анод; 8 – бавовняний (джутовий) мішок.

Найбільш поширений активатор являє собою порошкоподібну суміш наступного складу, %:

Сульфат натрію гранульований.....	25
Сульфат кальцію .....	25
Глина бентонітова.....	50

Категорично забороняється використовувати як активатор для протекторів коксову крихту, оскільки це різко збільшує контактну корозію анодів, знижує їх струмовіддачу й термін служби [20].

Стационарні потенціали комплектних протекторів з анодами зі сплаву МПУ та МПУ–вч відповідно рівні  $-1,60$  В і  $-1,62$  В відносно м.с.е. Теоретична струмовіддача становить  $2332$  А·год / кг.

Коефіцієнт корисної дії і поляризаційний опір протекторів залежать від анодної густини струму (рис. 3.19 і рис. 3.20) [19].

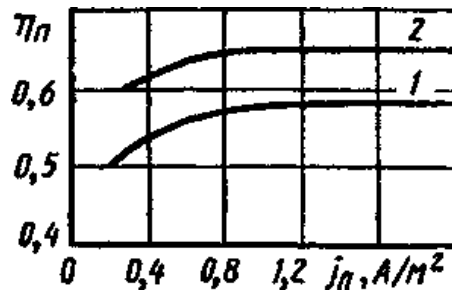


Рис.3.19.Залежність ККД від анодної густини струму комплектних протекторів: 1– сплав МПУ; 2– сплав МПУ–вч.

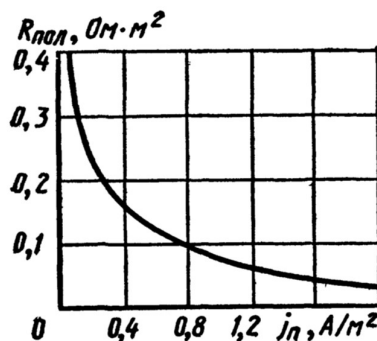


Рис.3.20.Залежність поляризаційного опору протектора від анодної густини струму

Для захисту підземних споруд можуть бути застосовані магнієві аноди П1–69, П2–69, ПЗ–69 і П4–69, що випускаються для захисту від корозії морських нафтопромислів по ТУ 48–10–23–80 (табл. 3.2).Протектори цієї серії випускають без активатора,тому у разі їх використання для підземних споруд слід передбачати активатор, кількість

якого залежить від розмірів протектора і діаметра свердловини. Склад активатора наведено вище [21].

*Таблиця 3.2. Технічні дані протекторів*

Тип протектора	Діаметр, мм	Довжина, мм	Маса, кг		Площа робочої поверхні, м <sup>2</sup>
			установки	Осередка	
П1–69	170	600	32,8	2,8	0,4
П2–69	170	1200	64,2	4,2	0,8
П3–69	100	600	12,8	2,8	0,23
П4–69	100	1200	24,2	4,2	0,46

Протяжні пруткові протектори ПМП являють собою біметалічний пруток з оболонкою з магнієвого сплаву і сталевим оцинкованим контактним стержнем діаметром 4 мм, що проходить по центру прутка. Протектори виготовляють довжиною до 1000 м і поставляють змотаними на барабани або в бухти. Форму перерізу (коло, еліпс) протекторів ПМП визначає технологія їх виготовлення.

Умови застосування протекторного захисту в значній мірі залежать від зовнішніх факторів, ступеня оголення металу споруди, що захищають, наявності блукаючих струмів і параметрів, що визначають властивості ґрунту [19].

Вибір протекторного захисту за певних умов роблять за результатами аналізу корозійної ситуації на підставі техніко–економічного порівняння з іншими видами захисту. Протекторний захист, як самостійний вид електрохімічного захисту, в основному застосовують для захисту від ґрунтової корозії. При захисті від блукаючих струмів протектори встановлюють в анодних і знакозмінних зонах при незначних середніх потенціалах, коли блукаючий струм може бути

скомпенсований струмом протекторів і при цьому буде забезпечений необхідний захисний потенціал. При цьому в знакозмінних зонах застосовують поляризовані установки, обладнані вентильними пристроями.

Рекомендується також застосування протекторних установок у комплексі з катодним захистом на трубопроводах або кабелях для розширення зон катодної поляризації.

Протекторний захист – досить ефективний вид електрохімічного захисту підземних споруд за умов [19-21]:

- питомий опір ґрунту не більше 50 Ом·м;
- блукаючі струми відсутні або невеликі і викликають анодні або знакозмінні зміщення потенціалів підземних споруд, середні значення яких не перевищують 0,1 В;
- густина необхідного захисного струму, визначена розрахунковим або експериментальним шляхом для споруд, не перевищує 10 мА / м<sup>2</sup> (є більшості випадків ці умови здійсненні, коли для локального захисту окремих підземних споруд розрахований захисний струм не перевищує 1 А).

Залежно від місцевих умов (стану захисного покриття підземної споруди, складу ґрунту, наявності блукаючих струмів і т.п.) ширина зони протекторного захисту може бути від 1 до 70 м. Найкращий ефект досягається, коли підземна споруда надійно електрично від'єднана від інших заземлених конструкцій та має хороше ізоляційне покриття. Тобто, найбільш ефективно протекторний захист працює у поєднанні з ізолюючими фланцевими з'єднаннями на трубопроводах та ізолюючими муфтами на кабелях.

Протекторні установки слід застосовувати для електрохімічного захисту наступних підземних металевих споруд [19-22]:

- резервуарів і газопроводів зріджених газів, які не мають контактів із суміжними протяжними металевими комунікаціями;
- окремих ділянок внутрішньоквартальних газопроводів природного газу або відведення газопроводів до споживачів, які не забезпечені захисними потенціалами по ГОСТ 9.015–74 від катодних перетворювачів, призначених для захисту міських магістральних або розподільних мереж;
- окремих ділянок водопроводів, виконаних зі сталевих труб (сталеві вставки);
- ділянок сталевих трубопроводів, електрично відсічених від загальної системи ізолюючими фланцевими з'єднаннями і ізолюючими вставками;
- міських кабелів зв'язку (в тому числі радіофікації, ліфтової та пожежної сигналізації), електричних силових кабелів, що мають металеві оболонки без захисних покривів шлангового типу;
- сталевих футлярів для прокладки комунікацій, підземних і заглиблених резервуарів та ємностей, днищ резервуарів, сталевих опор та інших зосереджених споруд.

Методи електрохімічного захисту підземних споруд від ґрунтової корозії (орієнтовний вибір яких виконується за рис.3.7) та необхідні протектори, які використовуються, класифіковані залежно від корозійної активності ґрунту у таблиці 3.3.

Протектори з активатором розміщують в свердловинах або шурфах в ґрунтах з питомим електричним опором не більше 50 Ом·м. Допускається встановлювати протекторні аноди без активатора в ґрунтах з питомим опором не більше 10 Ом·м [20].

Ефективність протекторного захисту значно знижується зі збільшенням питомого опору ґрунту. Питомий опір і його стабільність залежать від глибини установки протектора, тому протектори бажано встановлювати якомога глибше, як у вертикальному, так і

горизонтальному положеннях. При глибині укладання більш ніж 1,5 м різниця між опорами розтіканню горизонтально і вертикально розміщених протекторів становить всього 1–2% [19-20].

*Таблиця 3.3. Методи електрохімічного захисту підземних сталевих споруд від ґрунтової корозії*

Питомий електричний опір , Ом·м	Корозійна активність ґрунту	Методи електрохімічного захисту
1000 – 250	Низька	Катодна поляризація лише на магістральних трубопроводах і відводах від них. Катодний захист.
250 – 100	Низька	Катодна поляризація лише на магістральних трубопроводах і відводах від них. Катодний захист.
100 – 50	Середня	Катодна поляризація лише на магістральних трубопроводах і відводах від них. Катодний захист.
50 – 20	Середня	Катодний захист. Магнієві протектори масою 5 кг.
20 – 10	Підвищена	Катодний захист. Магнієві протектори масою 10 кг.
10 – 5	Висока	Катодний захист. Магнієві і цинкові протектори масою 10 – 20 кг (при $pH \leq 4$ магнієві протектори не застосовуються)
До 5	Дуже висока	Катодний захист. Магнієві і цинкові протектори масою 20 кг (при $pH \leq 4$ магнієві протектори не застосовуються)

На опір розтіканню протектора при інших однакових умовах впливає його форма і розміри. Найменший опір розтіканню при незмінній масі протектора буде у подовжених протекторів. З метою більш ефективного використання протекторних анодів рекомендують збільшувати висоту стовпа активатора і виконувати співвідношення  $l_{ак} / l_{ан} > 3$ , де  $l_{ак}$  – висота стовпа активатора,  $l_{ан}$  – довжина анода.



Встановлюють протектори осторонь від споруди, що захищають. Допускається встановлювати протектори під трубопроводами, якщо це вимушене рішення.

Відстань від протектора до споруди, що захищають, приймають в межах від 5 до 10 м, так як більш близьке розташування протекторів може привести до пошкодження ізоляційного покриття солями протектора, що розчиняється.

Протектори, що застосовуються для захисту протяжних і розгалужених споруд, як правило об'єднують в групи і під'єднання протекторів до споруди, що захищають, виконують через контактні пристрої (див. рис.3.16). Відстань між протекторами в групі від 3 до 6 м в залежності від типу і кількості протекторів, умов їх установки при оптимальному коефіцієнті взаємного екранування.

Поодинокі протектори підключають до споруди, що захищають, через германієві діоди із середнім значенням випрямленого струму 0,3 А, групові – через сплавні германієві діоди із середнім значенням випрямленого струму 3...10 А [19-22].

Поширеними також є кремнієві діоди з порогом відкриття 0,7 В і вище (на відміну від 0,3...0,5 В у германієвих типу Д7). Розроблено наступний метод зниження порогового значення напруги поляризованої протекторної установки. До протекторного вентиля підключають високоомне джерело напруги, що складається із сполучених послідовно джерела струму (електрохімічного елемента напругою 1,5 В)  $G1$  і опору  $R1$  (рис.3.21). При струмі протектора  $J_{pi} = J_{pe} = 150...180$  мА струм ланцюга зміщення буде  $J_{pe} = 0,05$  мА. Елементи схеми підібрані таким чином, щоб величина зміщення різниці потенціалів на діод Д1 становила 0,5 В, тому кремнієвий діод здатен відкритися при різниці потенціалів «протектор–споруда» 0,25...0,3 В. Прямий опір пристрою на відміну від діодів серії Д7

в 3 рази менше – близько 10 Ом. Зниження напруги джерела струму з 1,5 до 0,7 В призводить до зниження зміщення порогу відкривання з 0,5 до 0,4 В, тобто на 20%, що не позначиться істотно на роботі пристрою. Електрохімічний елемент типу «А» працює в такому пристрої без заміни близько року. У зимову пору року за температури нижче  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  електрохімічні елементи знімаються метою запобігання замерзанню. Це допустимо, тому що з пониженням температури ґрунту підвищується його питомий опір, що разом зі сповільненням активаційних процесів знижує швидкість як ґрунтової корозії, так і корозії від блукаючих струмів.

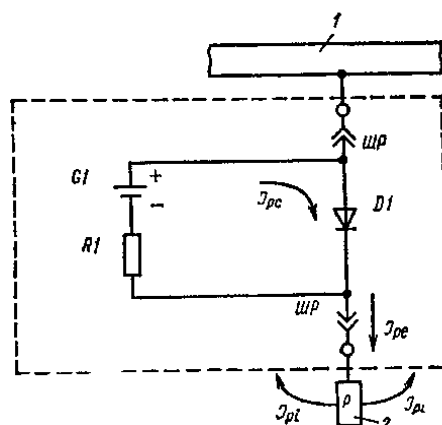


Рис.3.21. Схема протекторного вентиляного пристрою зі зміщеним порогом відкривання (0,3 В):

1 — споруда, що захищається; 2 — протектор

У знакозмінних зонах виникає необхідність в обмеженні впливу анодного і катодного струмів, що натікають і стікають зі споруди. Для стабілізації потенціалів в цих умовах перспективним є застосування здвоєних протекторних систем ефективного анода (протектора з металу, що має більш негативний електродний потенціал, ніж метал споруди), що підключається до споруди через діод, і ефективного катода, потенціал якого має більш позитивне значення, ніж метал споруди [19-20], що

підключається до споруди через транзистор зворотного провідності (рис.3.22).

Ефективний катод системи обмежує негативний потенціал споруди від глибокої поляризації блукаючими струмами в період катодного імпульсу. Обмеження здійснює керуючий електрод з певного сплаву, встановлений в активатор і включений в базу транзистора. Такий електрод має постійний потенціал щодо навколишнього ґрунту [19].

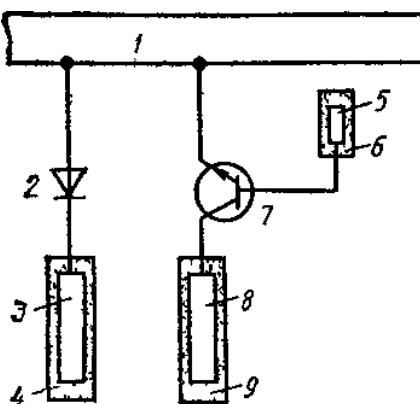


Рис. 3.22. Здвоєна поляризована протекторна установка на діоді і транзисторі:

- 1 – об'єкт захисту, 2 – діод, 3 – протектор (ефективний анод),  
4 – активатор протектора, 5 – допоміжний електрод, 6 – заповнювач  
допоміжного електрода, 7 – транзистор, 8 – ефективний катод,  
9 – заповнювач ефективного катода.

При потенціалі споруди більш негативному, ніж потенціал керуючого електрода, транзистор відкривається під дією позитивної напруги на базі і підземна споруда анодно поляризується від ефективного катода. Відбувається гальмування катодної поляризації споруди, яку захищають, тобто зниження надлишкового потенціалу споруди до рівня потенціалу керуючого електрода. Ефективний анод при цьому відключений від споруди діодом, і його включення відбувається лише в

момент, коли потенціал споруди стане більш позитивним, ніж потенціал ефективного анода [22].

При наявності блукаючих струмів промислової частоти поляризований протектор являє собою локальний випрямляч. У анодний напівперіод струм безперешкодно стікає з протектора в ґрунт, а в катодний напівперіод вентиль закривається, і підземна споруда поляризується катодно. Таким чином, в системі «протектор–споруда» безперервно діє постійна складова змінного струму, яка і забезпечує автоматичний катодний захист підземної споруди в зоні дії змінного блукаючого струму.

### **3.3. Електрокорозія**

Електрокорозія – це корозія під дією зовнішнього джерела струму або блукаючогоструму. Прояви електрокорозії у вигляді наскрізних пошкоджень підземних трубопроводів відомі ще з 80–х років XIX століття після прокладання підземних ліній метрополітену у Берліні, де рішенням цієї проблеми займався Нернст. Швидкість електрокорозії залежить від виду (постійний, змінний) і параметрів струму (сила, частота), від властивостей металу, властивостей навколишнього середовища (ґрунту чи водного середовища), до яких відносяться температура, вологість, провідність, наявність агресивних компонентів. Найчастіше електрокорозія викликається так званими блукаючими струмами, джерелом яких можуть бути різні електроустановки [20].

#### **3.3.1. Джерела блукаючих струмів**

Блукаючими струмами називаються струми, що протікають поза основної струмопровідної системи по шляхах, що не призначені для їх протікання. Вони класифікуються по виду джерела і за умовами виникнення. Розрізняють шість типів блукаючих струмів [19-21]:

– **Електротягові блукаючі струми.** Їх джерелами є струмопровідні колії. При проходженні по рейках електричного струму частина його витікає в землю внаслідок того, що рейки завжди мають природний електричний контакт з ґрунтом. При цьому утворюються великі зони розтікання блукаючих струмів. Частка струму витоку з рейок в землю тим більше, чим більше поздовжній опір рейкових шляхів, чим менше перехідний опір від рейок до ґрунту і чим більше електропровідність ґрунту. Електротягові блукаючі струми виявляються найбільш часто внаслідок великої потужності джерела і тривалості протікання. Також велике значення має потужність споживача електричного струму. Так найбільш інтенсивні анодні зони біля тягової підстанції викликає електропотяг, що розганяється або рухається у гору внаслідок розвитку максимальної потужності електродвигуна.

– **Струми витоку з електричних мереж.** Вони утворюються внаслідок порушення ізоляції струмоведучих провідників від землі, зокрема, при різних замиканнях на землю, в результаті чого частина струму витікає з мережі в землю, поширюючись в різних напрямках. Величина і зона поширення струмів витоку з електричних мереж залежить в основному від напруги, геометрії мережі, типу короткого замикання та електричних властивостей середовища.

– **Струми електромагнітного впливу.** Джерелами цих струмів є електричні мережі як змінного, так і постійного струму. Блукаючі струми цього типу виникають в схильній до впливу мережі (електропідливній, вимірювальній, мережі управління та ін.), що знаходиться на якійсь відстані від діючої мережі, в результаті індуктивного (магнітного) і електричного впливу. Магнітний вплив особливо небезпечний при різких змінах струму в діючій мережі, електричний вплив тим сильніше, чим вище потенціал діючої мережі.

– **Струми електромагнітних випромінювань.** Джерелами таких блукаючих струмів можуть бути різні пристрої, що генерують електромагнітні коливання (передавачі, радіолокаційні установки і т.п.). Величина блукаючого струму, що виникає в схильній до впливу мережі (що грає роль прийомної антени), залежить від потужності джерела, відстані від нього, схильності мережі до впливу та її орієнтації щодо напрямку поширення електромагнітних хвиль.

– **Струми електричних розрядів.** Джерелами блукаючих струмів цього типу є різні наелектризовані тіла, або тіла, що мають залишковий електричний заряд. Електризація відбувається при механізованому заряджанні шпурів, в результаті сніжних буревіїв, при терті різних матеріалів, наприклад, на одязі робітників і т.п. У результаті електризації тіла накопичують той чи інший електричний заряд. Він може виникнути і без електризації, наприклад, на кабелі після його відключення, якщо кабель не заземлений. При перерозподілі зарядів в системі заряджених тіл протікають струми, величина яких залежить від величини зарядів і електричних параметрів ланцюгів, по яких тече струм.

– **Струми грозових розрядів і ударів блискавки.** Грозові розряди і удари блискавки також є джерелами блукаючих струмів. Під час грози утворюються електричні поля великої напруги, обумовлені хмарами, як зарядженими тілами. Крім того, під час руху зарядженої хмари на ділянці землі, під цими хмарами, утворюються протилежно заряджені області, що переміщуються відповідно до переміщення хмар. Перерозподіл або зміна зарядів призводить до протікання струму. При ударі блискавки в наземне спорудження або в землю утворюються великі зони розтікання струму в землі [25].

– **Телуричні струми.** В землі постійно протікають струми природного походження, зумовлені внутрішніми процесами в земній корі – телуричні

струми. Густина цих струмів залежить від варіацій магнітного поля землі, геофізичних властивостей середовища, електрохімічних і термоелектричних процесів в гірських породах, вона істотно менша густини струму інших типів. Телуричні струми не становлять реальної небезпеки щодо впливу на електропідливну мережі або інші об'єкти. Проте останнім часом з'являються дані про існування телуричних струмів надзвичайно високої потужності, що короткий час протікають на межі мантиї і земної кори, причому, наслідком таких підземних блискавок можуть бути навіть землетруси [25].

Загалом, джерелами блукаючих постійних струмів зазвичай є шляхи електропоїздів (електричні залізниці постійного струму магістральні й приміські, трамваї, метрополітен), лінії промислового і шахтного підземного транспорту, заземлення ліній передачі постійного струмуза системою «провід – земля», установки для електрозварювання, системи катодного захисту і установки для нанесення гальванічних покриттів. Джерелами блукаючих змінних струмів, зазвичай, називають заземлення ліній змінного струму або струми, що індуковані в трубопроводах прокладеними поруч з електричними кабелями. Приклад виникнення блукаючого постійного струму від трамвайної лінії, де сталеві рейки використовуються для повернення струму до генераторної станції, показаний на рис.3.23. Як видно із рис.3.23, позитивний полюс джерела живлення підключається до контактного проводу (у метрополітені до контактної рейки), а негативний – до ходових рейок. При такій схемі електропостачання тяговий струм від позитивної шини тягової підстанції по лінії живлення надходить в контактний провід, а звідти через струмоприймач до двигунів електровоза і далі через рейки у втягуючу лінію й до мінусової шини тягової підстанції. Оскільки рейки не ідеально ізольовані від землі, то частина тягового струму витікає з них в землю.

Величина струму стікання, який називають блукаючим, тим більше, чим менше перехідний опір між рейками і землею, і чим більше поздовжній опір рейок. Тобто, внаслідок поганого контакту рейок на стиках і недостатньою ізоляції їх від землі частина струму виходить в ґрунт і знаходить шляхи з низьким опором, наприклад підземні газо- і водопроводи. На рис. 3.23 навколо підземної труби показана діаграма розподілу потенціалу, з якої видно, що зона труби 6, у яку входить блукаючий струм, має катодну поляризацію, а зона 8, з якої струм повертається у ґрунт і далі до тягової підстанції, – має анодну поляризацію. Оскільки у системі ґрунт–сталь саме залізо є найкращим відновником, то струм у ґрунт виходить у вигляді іонів заліза(II), тобто, метал анодно розчиняється. Якщо в анодній зоні труба захищена неметалевим покриттям з високим електричним опором, то це посилює корозійні руйнування саме наскрізного типу. Причина полягає у тому, що всяке реальне технічне неметалеve покриття характеризується певною величиною водопроникності, внаслідок чого блукаючі струми виходять через малу площу дефектів захисного покриття з дуже високою густиною і зумовлюють прискорене руйнування труби [19-20].

Із рис.3.23 випливає, що при зближенні кабелю зв'язку з рейками електричних залізних доріг, анодна зона на ньому виникає, як правило, поблизу місця підключення втягуючої лінії, а катодна зона змінює своє положення разом зі зміною положення електровоза. На ділянці кабелю, між анодною і катодною зонами, в залежності від місцевих умов і розподілу навантаження, може мати, місце так звана нейтральна зона, в якій не спостерігається ні втікання струму в кабель, ні витікання з нього, або знакозмінна зона, в якій знак потенціалу кабелю по відношенню до ґрунту час від часу змінюється. Виникнення знакозмінної зони



обумовлюється зазвичай наявністю на лінії в районі ділянки зближення кількох електровозів [19].

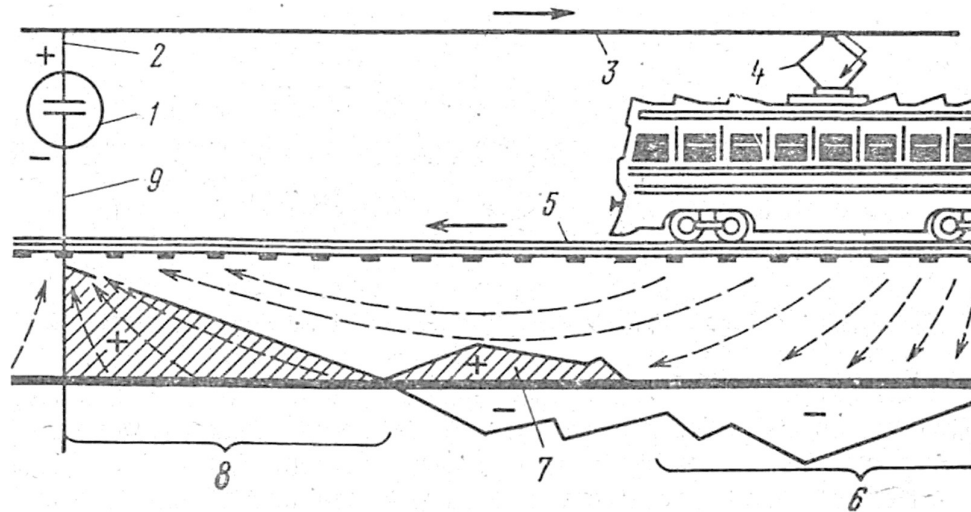


Рис.3.23. Корозія підземної труби під дією блукаючих струмів:  
(штрихові стрілки — блукаючі струми ; суцільні стрілки — тяговий струм)

- 1 – тягова підстанція; 2–основна лінія; 3 – контактний провід;  
4 – струмоприймач; 5 – рельси; 6– катодна зона; 7 –знакозмінна зона;  
8–анодна зона; 9 – втягуюча лінія.

При перетині підземної комунікації з рейковими шляхами електричних залізниць, вона може мати позитивний, негативний або знакозмінний потенціал по відношенню до ґрунту, причому знак потенціалу, як правило, визначається віддаленням місця перетину від втягуючого пункту, режимом руху електровозів на даній гілці, напрямом залягання підземної комунікації до і після ділянки перетину і рядом інших факторів (довжиною ділянки зближення, кутом перетину, перехідним опором між підземною спорудою та землею, поздовжнім опором споруд, питомим опором навколишнього ґрунту та ін.) [19-20].

### 3.3.2. Вплив блукаючих струмів на підземні споруди

Найчастіше блукачі струми спостерігаються на ділянках станційних колій електричних залізниць, де, як правило, мають місце малий перехідний опір між рейками і землею і значні тягові пускові струми. Блукаючі струми, що виникають при роботі електричних залізних доріг і трамвая, можуть поширюватися на великі відстані. Чим менший питомий опір землі, тим легше і в більшій кількості блукаючі струми розтікаються з місць, де неможливо створити повноцінний електроізолюючий насип між землею і колією, або з місць, де пошкоджено електричний контакт між рейками колії. Цьому часто сприяють різні аномалії ґрунтів з низьким питомим опором, що залягають нижче. В умовах міста поширенню блукаючих струмів сприяє густа мережа підземних металевих комунікацій різного призначення (газопроводів, теплопроводів, кабелів зв'язку та енергетики і ін.), оскільки такі металеві споруди завдяки своєму низькому опору, порівняно з ґрунтом, відіграють роль колекторів струму, провокуючи вихід блукаючих струмів у землю.

Ділянка рейкового шляху, на якому знаходиться електровоз, має позитивний потенціал по відношенню до навколишньої землі, а ділянку в районі підключення вітягуючої лінії тягової підстанції – негативний. Так як на ділянці між двома тяговими підстанціями може перебувати кілька електровозів, то в залежності від їх розташування та величини тягового струму потенціали окремих ділянок рейкової колії будуть змінюватися як за величиною, так і за знаком. Таким чином, в моменти, коли рейки мають позитивний потенціал щодо землі, в результаті витoku струмів відбувається корозія, яка призводить до передчасного зносу рейок і елементів їх кріплення [19-25].

Якщо враховувати, що зазвичай поблизу рейкових шляхів пролягає або перетинається з ними велика кількість підземних металевих комунікацій різного призначення, то цілком допустимо, що частина блукаючого струму на окремих ділянках (катодних зонах) затікає в ці споруди, а потім на інших ділянках (анодних зонах) витікає з них. Виникає як би гігантська електролітична ванна, електродами якої на підземній металевій споруді є ділянки входу (катодні зони) і виходу (анодні зони) струмів. У катодних зонах метал підземної споруди електрично негативний по відношенню до навколишнього середовища, а в анодних, навпаки, – позитивний. Вимушена зміна природи носія заряду на межі метал–грунтовий електроліт в анодних зонах веде до руйнування підземної комунікації внаслідок виходу з неї іонів металу.

Анодний і катодний процеси при блукаючих струмів відбуваються на територіально віддалених один від одного ділянках, протяжність яких може бути досить значною. Інтенсивність процесів блукаючих струмів значно вище, ніж при всіх інших видах корозії [19].

### **3.3.3. Методи визначення присутності блукаючих струмів в ґрунті**

#### **3.3.3.1. Вимірювання потенціалу ґрунту і підземної споруди**

Потенціал підземної структури, який вимірюється у порівнянні з мідно–сульфатним електродом, має досягти стаціонарного значення приблизно за 15 хв, якщо у ґрунті відсутні змінні блукаючі струму. Вимірюваний потенціал спорудимає різко і часто змінюватися у зонах виникнення блукаючих струмів в результаті індукованої поляризації, яка носить випадковий характер. Зміни можуть мати місце як в позитивному, так і в негативному напрямку по відношенню до стаціонарного потенціалу. Таким чином, на основі вимірювання потенціалу підземної споруди варіацій вимірюного сигналу можна визначити присутність

блукаючих струмів. Вимірювання потенціалу може бути виконано за допомогою вимірювача напруги з високим внутрішнім опором (мінімум 100 кОм), як показано на рис.3.24. Один з виходів вольтметра підключено до підземної конструкції за допомогою кабелю (наприклад, в контрольно–вимірювальних точках або з фітингами, доступними в контрольних камерах). Другий вхід вимірювача підключений до електроду порівняння, який розташований на поверхні землі якомога ближче до місця залягання підземної споруди. В польових умовах частіше застосовують насичений мідно–сульфатний електрод [20].

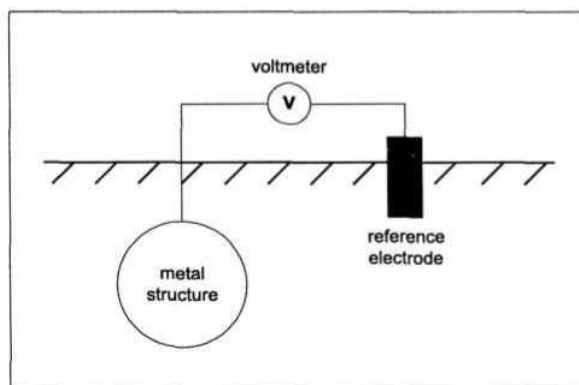


Рис.3.24. Вимірювання потенціалу підземних споруд

Практика показує, що якщо впродовж декількох хвилин різниця між мінімальними і максимальними значеннями потенціалу перевищує 50 мВ, то електролітична корозійна небезпека для підземної комунікації має бути досліджена більш ретельно. Чим більше діапазон випадкових стрибкоподібних змін виміряного потенціалу, тим більше інтенсивність блукаючих струмів в області вимірювань і велика ймовірність їх руйнівної дії. Проте необхідно мати на увазі, що існують також постійні блукаючі струми, або струми, зміна інтенсивності й напрямку яких змінюється набагато повільніше, не процедура вимірювання потенціалу підземної споруди. Тому даний метод принципово не дозволяє стверджувати

відсутність блукаючих струмів, але дозволяє однозначно показати їх присутність.

У деяких наближеннях можна припустити, що якщо середнє значення потенціалу сталевї структури бїльш позитивне, нїж  $-400$  мВ в порївнянні з мїдно–сульфатним електродом, то їснує висока небезпека електролітичної корозїї, якщо значення бїльш негативне, нїж  $-700$  мВ, тоді нїякої небезпеки не їснує. Таке твердження добре узгоджується з практичними критерїями катодного захисту, проте не може бути правилом, оскїльки середнє значення маскує можливїсть наявностї в одній вузькій зонї високої анодної поляризацїї, яка стане причиною наскрізних пошкоджень.

Найбїльш їнформативним методом визначення блукаючих струмів є звичайно бїльш трудомїсткий метод, данї для якого дають численї польовї вимїрювання потенціалів ґрунту та/або металевї споруди. Наприклад, струм, що виникає від будь–якого джерела, що виходить з пїдземної труби або входить у неї, може бути розрахований шляхом вимїрювання рїзниці потенціалів мїж поверхнею ґрунту прямо над трубою і дїлянкою ґрунту, трохи вїддаленої від труби пїд прямим кутом до неї. Якщо  $E$  – вимїряна рїзниця потенціалів, то [19-20]

$$E = \frac{\rho j}{2\pi} \ln \frac{y^2 + h^2}{h^2}, \quad (3.35)$$

де  $\rho$  – питомий опір ґрунту;  $h$  – глибина залягання труби;  $y$  – вїдстань мїж точками вимїрювання потенціалів;  $j$  – загальний струм, що входить або виходить з поверхнї труби на одиницю довжини.

### 3.3.3.2. Вимїрювання електричного поля в ґрунті

Блукаючі струми викликають електричне поле в землї, пов'язане з їх протїканням через електролітичне середовище. Змїни цього поля носять випадковий характер, тому наявнїсть блукаючих струмів можна виявити,

досліджуючи зміни вектору електричного поля в землі. Зазвичай такі дослідження проводяться шляхом вимірювання падіння напруги з двоканальним реєстратором в землі в двох напрямках X–Y, перпендикулярних один одному, між ідентичними електродами на відстані приблизно 30 м один від одного (рис.3.25). Постійне значення вектору електричного поля в наземних точках вказує на відсутність динамічних блукаючих струмів в місці вимірювання. Якщо динамічно змінюється виміряне значення, то це вказує на виникнення блукаючих струмів в регіоні. На підставі знаку вектору електричного поля можна визначити напрямок потоку блукаючого струму в цій області [21].

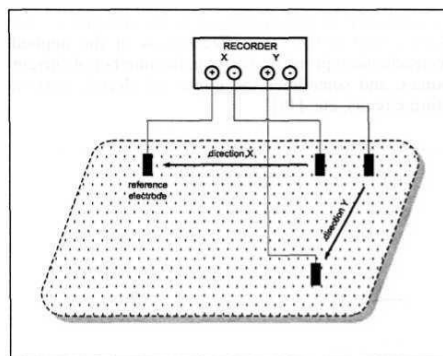


Рис.3.25. Вимірювання розподілу електричного поля в ґрунті

Динамічні зміни потенціалу підземної комунікації або вектору електричного поля в землі вказують тільки на наявність блукаючих струмів. Важко зробити точні висновки про напрям поляризації: анодної чи катодна або знакозмінна. Тим більше неможливо зробити висновки про наявність електродних процесів, що відбуваються на поверхні металевої конструкції.

### 3.3.4. Розподіл блукаючих струмів за різних умов

Механізм виникнення блукаючих струмів в землі від установок рейкового транспорту був представлений на рис.3.23. Вплив стаціонарних джерел блукаючих струмів може бути не менш складним. Приклад впливу установок катодного захисту наведено на рис.3.26 [20].

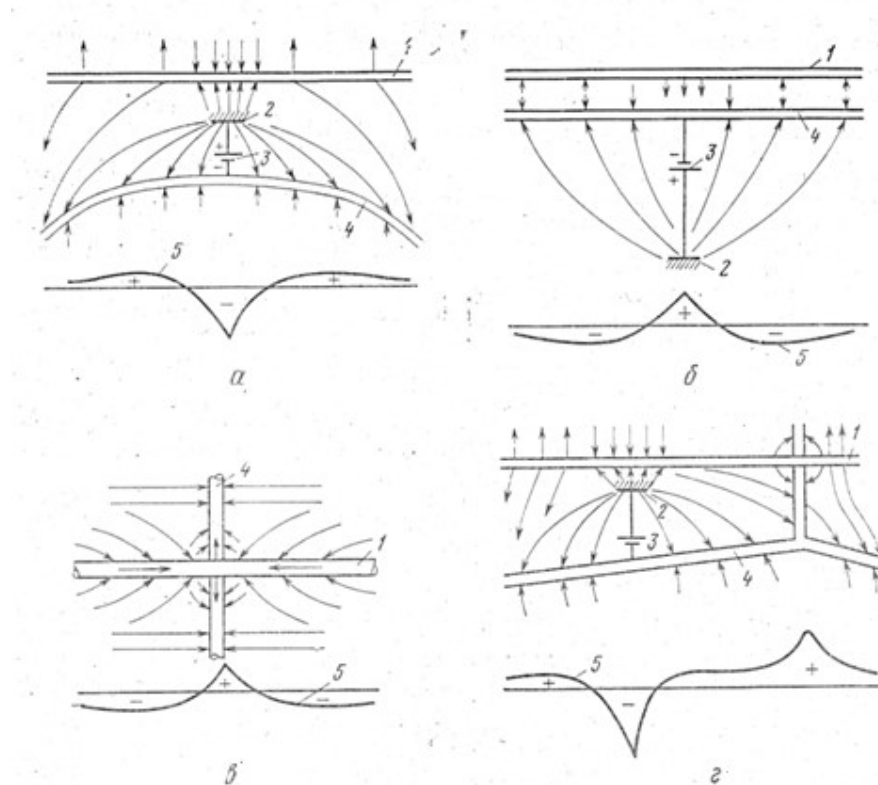


Рис.3.26. Виникнення блукаючих струмів від систем катодного захисту:

а – переважний вплив анодного заземлення; б – переважний вплив електричного поля катодно захищеного протяжного підземного об’єкта;

в – вплив перетину підземних комунікацій; г – вплив при одночасному зближенні і перетині підземних комунікацій; 1– об’єкт дослідження; 2 –анодне заземлення; 3 – катодна станція; 4 –катодно захищений об’єкт; 5 – потенційна діаграма досліджуваного об’єкта.

У процесі роботи катодних установок на трубопроводах (рис.3.26) струми, що стікають з анодного заземлення, поширюються по землі і втікають в сусідні споруди, надаючи їм негативний захисний потенціал. Однак деяка частина струму, зустрічаючи на своєму шляху інші підземні металеві споруди, може втікати в них, поширюватися в тому чи іншому напрямку, а потім витікати, повертаючись до мінуса джерела, що його породила. Залежно від взаємного розташування катодно захищеної споруди та споруди, яка піддається впливу сусідньої системи катодного захисту, можуть мати місце два прямо протилежних випадки, обумовлені впливом електричних полів анодного заземлення та катодно захищеного трубопроводу [19-21].

У першому випадку, коли досліджуваний підземний металевий об'єкт розташований поблизу анодного заземлення катодної установки (рис.3.26а), на ділянці навпроти анодного заземлення виникає катодна зона, а на периферії в обидві сторони від неї – анодні зони. Розподіл потенціалів на досліджуваному об'єкті в цьому випадку пояснюється переважною дією поля струмів анодного заземлення, що позитивно поляризується по відношенню до землі.

У другому випадку при паралельному зближенні трубопроводу, що захищений катодно, з досліджуваним об'єктом (рис.3.26б), струми в землі створюють катодні зони по периферії ділянки зближення і анодна зона на ділянці навпроти місця підключення установки катодного захисту. Такий розподіл потенціалів на досліджуваному об'єкті пояснюється переважанням впливом поля струмів протяжного катодного заземлювача, тобто катодно захищеного трубопроводу, що знаходиться під негативним потенціалом по відношенню до землі.

Можливий і третій випадок розташування між катодно захищеним трубопроводом і анодним заземленням. Картина впливу струмів катодного



захисту на досліджуваний об'єкт при цьому буде визначатися переважним впливом одного з електричних полів – анодного заземлення або трубопроводу.

Слід зауважити, що працюючі катодні станції можуть створювати в землі значні величини блукаючих струмів. Так, при катодного захисту трубопроводів великих діаметрів, що мають погану ізоляцію, величина струму в землі може становити десятки і навіть сотні ампер. У зв'язку з цим шкідливий вплив струмів катодного захисту трубопроводів на сусідні підземні металеві споруди, в тому числі і кабелі зв'язку, може проявлятися на значній відстані їх від анодних заземлень і захищених трубопроводів. Шкідливий вплив струми катодного захисту трубопроводів можуть створювати і при перетині досліджуваного об'єкта з катодно захищеним трубопроводом (рис.3.26в).

На практиці можуть зустрічатися і комбіновані випадки впливу при одночасному зближенні і перетині підземних протяжних об'єктів, один з яких є катодно захищеним (рис.3.26г) [20].

### **3.3.5. Технічні засоби захисту від блукаючих струмів**

Заходи захисту підземних металевих споруд від корозії блукаючими струмами за своїм призначенням можуть бути розділені на три великі групи (рис. 3.27): по–перше, заходи з обмеження величин блукаючих струмів у ґрунті від різних джерел (реалізуються безпосередньо на джерелах блукаючих струмів), по–друге, заходи зі зменшення проникнення блукаючих струмів в підземні протяжні металеві споруди, по–третє, заходи захисту від блукаючих струмів, які вже проникли в підземну протяжну споруду. Найбільший ефект досягається у тих випадках, коли реалізуються заходи всіх трьох груп [19-21].



Рис. 3.27. Способи захисту підземних металевих споруд від корозії під дією блукаючих струмів

Перша група заходів – обмеження блукаючих струмів у ґрунті можна досягти спеціальними заходами на джерелах блукаючих струмів, які частково або повністю використовують землю як струмопровід, а також на установках промислових підприємств, що споживають постійний струм з технологічною метою. До таких джерел відносяться приміські й магістральні залізниці, трамвайні шляхи і метрополітен, електрифіковані залізниці промислового транспорту, лінії передачі енергії постійного струму за схемою «провід – земля», цехи електролізу та гальванічних покриттів і т. п.

Обмеження блукаючих струмів в землі практично може бути забезпечено тільки для установок рельсового транспорту (рис. 3.28). При цьому блукаючі струми, що створюються рельсовим транспортом постійного струму, можуть бути обмежені шляхом збільшення перехідного

опору між рельсами і землею або провідності рельсового шляху, а також реалізації деяких інших схемних рішень [19-20].

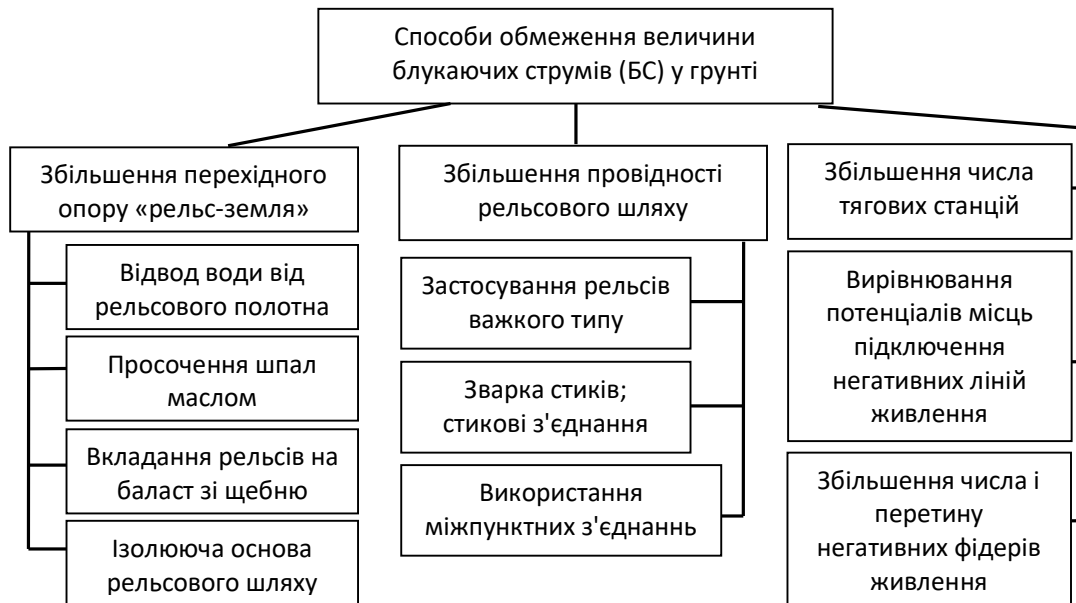


Рис.3.28. Способи обмеження величини блукаючих струмів у землі

Зменшення проникнення блукаючих струмів у підземні металічні споруди досягається шляхом: віддалення останніх від джерел блукаючих струмів, зменшення числа перетинів з рельсами електрифікованого транспорту, збільшення перехідних опорів між підземною металічною спорудою і ґрунтом, а також збільшення прокольного опору самої споруди.

Ідеальним рішенням питання зменшення проникнення блукаючих струмів у підземні протяжні металічні споруди є їх на таких відстанях від джерел, за яких вплив блукаючих струмів у землі практично не виявляється. Таке рішення може привести до збільшення протяжності споруди, розміщення її в незручних для прокладання, обслуговування й експлуатації місцях і т. п. У таких випадках найбільш правильно розміщувати споруду на таких відстанях від джерела блукаючих струмів, за яких найбільш дешево й ефективно можна забезпечити електрохімічний захист [21].

Очевидним є захід, який передбачає зменшення блукаючих струмів за рахунок можливого скорочення числа перетинів. При цьому слід враховувати, що величина блукаючого струму, який потрапляє в підземну металеву споруду, визначається при інших рівних умовах не тільки числом перетинів, але й кутами, під якими ці перетини проходять. Оптимальним є кут перетину в  $90^\circ$ . Кут перетину менше  $75^\circ$  небажаний [19-21].

Збільшення перехідного опору між підземною металічною спорудою і землею може бути досягнуто за рахунок застосування захисних покриттів і покрів різного типу, які мають високі ізоляційні властивості, а також спеціальних методів прокладання. Певний ефект може надати застосування спеціальних методів прокладання (неметалічні труби, блоки, канали, тунелі, колектори і т. д.), але воно у більшості випадків не позбавляє від необхідності використання додаткових заходів із захисту.

Подвійний опір підземних металевих споруд може бути збільшено шляхом обладнання спеціальних ізолюючих муфт, фланців або прокладок. Збільшення вказаного опору певною мірою зменшує проникнення блукаючих струмів, але ступінь зменшення залежить від багатьох різноманітних факторів. До числа цих факторів відноситься питомий опір ґрунту, наявність і стан ізолюючих захисних покриттів і покрів, частота встановлення ізолюючих муфт і т. д.

На практиці ізолюючі муфти дуже рідко використовують у чистому вигляді. У більшості випадків вони застосовуються разом зі струмовідводами, які встановлюють по одну або обидві сторони від ізолюючих муфт у залежності від місця їх розміщення (в анодній, катодній або знакозмінній зоні підземної споруди) або шунтуються змінними опорами, ємностями, діодами у необхідних за конкретних умов сполученнях.

Захист підземної металевої споруди від дії проникаючих неї блукаючих струмів відбувається способами електрохімічного захисту—нейтралізація дії блукаючих струмів шляхом застосування катодних установок і поляризованих протекторів або відводу блукаючих струмів від підземної споруди через електричні дренажі чи струмовідводи, що забезпечує необхідну катодну поляризацію споруди.

Катодний захист від корозії блукаючими струмами застосовують тільки у тих випадках, коли використання прямих, поляризованих чи посилених дренажів малоефективно або невиправдано за техніко—економічними умовами.

Протекторний захист може бути застосований тільки у випадках незначних впливів, коли величина блукаючих струмів може бути скомпенсована струмом протекторного захисту при забезпеченні потрібного захисного потенціалу.

Основним засобом захисту від корозії блукаючими струмами, що проникли у підземну металеву споруду, яка не має надійних ізолюючих покривів або покриттів, є електродренажний захист, котрий може бути виконаний шляхом застосування прямих, поляризованих і посилених електродренажних установок [19-21].

### **3.3.5.1. Установки для електродренажу**

Електродренажний захист— найбільш ефективний захист від блукаючих струмів. Основний принцип його полягає в усуненні анодних зон на підземних спорудах. Це досягається відводом (дренажем) блукаючих струмів з ділянок анодних зон споруд в рельсову частину ланцюга електротяги, яка має негативний або знакозмінний потенціал, або на негативну шину втягуючих ліній тягових підстанцій. Потенціал споруди зміщується при цьому в негативний бік, а анодні зони,

викликані відтоком блукаючих струмів, ліквідуються. При цьому катодні зони в місцях входу блукаючих струмів на споруді зберігаються. Очевидно, що електродренаж працює коректно тільки у тому випадку, коли різниця потенціалів «споруда – елемент рельсового шляху» забезпечує споруді потенціал катодного захисту автоматично або задається спеціально додатковим джерелом постійного струму [19].

Для нормального дренажу падіння напруги в дренажному кабелі має бути менше різниці потенціалів «споруда – рельс». Тому застосування дренажного захисту виправдано лише при відносно близькому розташуванні захищуваної споруди від рельсів або втягуючих пунктів. За великої довжини дренажного кабелю для зменшення втрат напруги необхідно збільшувати його перетин, що може виявитися економічно недоцільно. У таких випадках рекомендують переходити на захист із застосуванням катодних станцій або протекторних установок.

Електродренажний захист проводять за допомогою установок прямого, поляризованого і посиленого дренажу при мінімальному значенні середньої величини струму, що дренують, який забезпечує захист споруди на потрібній довжині і при заданому значенні захисного потенціалу.

Прямий електричний дренаж (рис.3.29) є найбільш простим за конструкцією й має реостат для регулювання струму, що дренується. Безреостатний дренаж недопустимий внаслідок можливості виникнення струму, який стане небезпечним для споруди, що захищають [20].

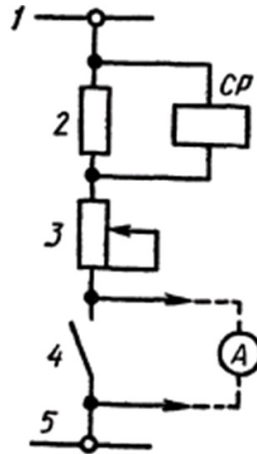


Рис.3.29. Принципова схема прямого електричного дренажу:

1 – рельс; 2 – запобіжник; 3 – змінний резистор; 4 – рубильник;  
5 – споруда, що захищають; CP – сигнальне реле; А – амперметр.

Прямий електричний дренаж застосовують у тих випадках, коли потенціал споруди  $E_c$  постійно вище потенціалу елемента рельсової мережі  $E_p$ , куди відводиться блукаючий струм. Крім того, щоб запобігти відтоку блукаючих струмів у землю в пункті дренажу з подальшою корозією підземної споруди різниця потенціалів «споруда–рельс»  $\Delta E_{cp}$  має бути більшою різниці потенціалів «споруда–земля»  $\Delta E_{cz}$ . Прямий дренаж має двосторонню провідність. Тому він знаходить застосування лише в обмежених випадках, коли гарантовано переважання потенціалу споруди над потенціалом у пункті дренажу, тобто виключена можливість стікання струмів рельсової мережі в споруду [19].

Поляризований дренаж відрізняється від прямого електродренажу однобічною провідністю і застосовується у тих випадках, коли потенціал споруди  $E_c$  по відношенню до потенціалів рельсів  $E_p$  і землі  $E_z$  позитивний або знакозмінний (тобто напрям блукаючих струмів змінюється) й одночасно різниця потенціалів «споруда–рельс»  $\Delta E_{cp}$  переважає різницю потенціалів «споруда–земля»  $\Delta E_{cz}$ . Внаслідок своєї

однобічної провідності поляризований дренаж заважає зворотному проходженню струму з рельсів усюди, що захищають, при переважанні потенціалу рельсів по відношенню до потенціалу споруди [22].

Однобічна провідність поляризованого дренажу досягається застосуванням напівпровідникових діодів (рис.3.30).

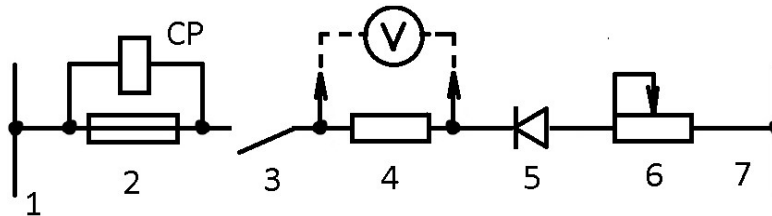


Рис.3.30. Принципова схема поляризованого електричного дренажу:

СР – сигнальне реле; V – вольтметр; 1 – рельс; 2 – запобіжник;  
3 – вимикач; 4 – шунт; 5 – діод; 6 – змінний опір; 7 – споруда.

Відносно високий прямий опір напівпровідникових діодів знижує чутливість електродренажу. Підвищення чутливості може бути досягнуте в схемах з застосуванням германієвих діодів або у схемах з додатковою поляризацією кремнієвого діода від сухого елемента живлення, аналогічно рис.3.21 [19].

Для захисту споруд, які розміщені в зоні впливу змінних блукаючих струмів, може бути рекомендовано пристрій, що являє собою звичайний електродренаж, вдосконалений шляхом додатково включених діода, ємності і струмовідвода, завдяки чому об'єкт захисту поляризується постійно, навіть при позитивних потенціалах рельсів (рис.3.31). Схема дозволяє забезпечити електричний захист підземної споруди за рахунок накопичення енергії блукаючих струмів за допомогою ємності, включеної на напругу витоку «рельс–споруда» при негативних потенціалах рельсів і розряду ємності на споруду, що захищають, (форсування захисного струму) при позитивних потенціалах рельсу.



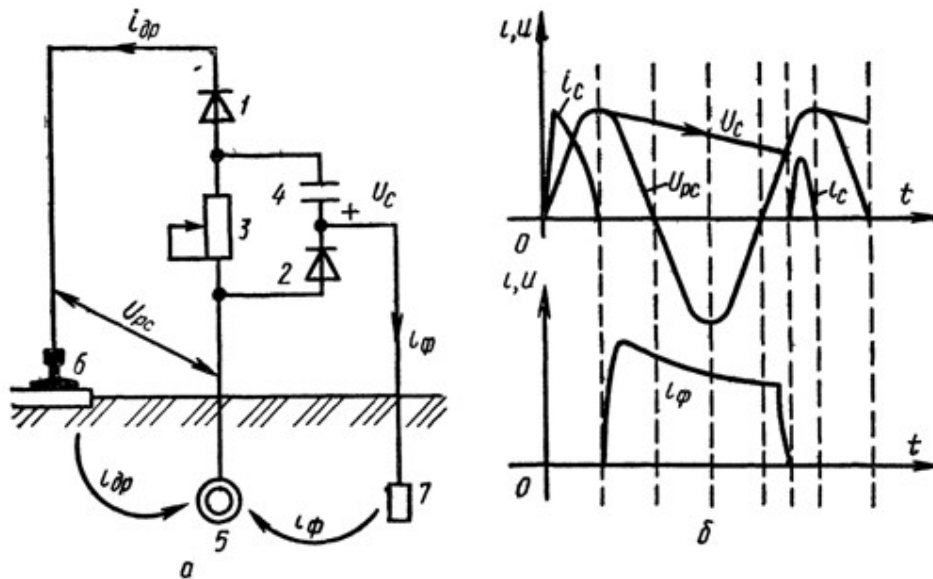


Рис.3.31. Пристрій для захисту споруд у зоні впливу змінних блукаючих струмів (а) і криві напруг і струмів (б):

1,2 – діоди; 3 – змінний опір; 4 – ємність; 5 – споруда; 6 – рельс;

7 – допоміжний електрод (струмовідвод);  $U_C$  – напруга ємності;

$U_{CP}$  – напруга «рельс–споруда»;  $i_{др}$  – струм дренажу;

$i_\phi$  – струм розряду ємності.

Установки поляризованого електродренажу з номінальними вихідними параметрами мають відповідати даним таблиці 3.4 [19].

Таблиця 3.4. Номінальні вихідні параметри установок поляризованого електродренажу

Сила струму, А	Зміна дренажного опору, Ом	Дренажний опір, Ом	Сила струму, А	Зміна дренажного опору, Ом	Дренажний опір, Ом
50	0,060	0,60	200	0,025	0,25
60	0,050	0,50	250	0,020	0,20
80	0,045	0,45	300	0,019	0,19
100	0,040	0,40	500	0,018	0,18
160	0,030	0,30	800	0,012	0,125

У випадку, коли рівень негативного потенціалу джерела блукаючих струмів є недостатнім для забезпечення потенціалу повного катодного захисту підземної споруди, допускається застосування посиленого дренажу.

Посилений електродренаж використовують при додатніх і знакозмінних по відношенню до землі потенціалах споруди (що зумовлено дією кількох джерел блукаючих струмів), а також у випадку, якщо застосування посиленого дренажу економічно вигідніше, ніж збільшення площі перетину дренажного кабелю.

Посилений дренаж (рис.3.32) – це комбінація поляризованого дренажу і станції катодного захисту. Його призначення – створення захисного негативного потенціалу споруди у момент, коли ділянка рельсового шляху набуває надто позитивних значень. Посилені дренажі мають наступні переваги порівняно з іншими видами дренажу: більш широке регулювання захисного потенціалу, можливість зниження перетину дренажного кабелю, менший вплив на сусідні незахищені підземні споруди порівняно з використанням катодних станцій. Разом з тим, посилений дренаж використовують порівняно рідко внаслідок того, що позитивний полюс додаткового джерела живлення, підключений до рельсів, може заважати коректній роботі електричного обладнання залізниці й збільшує знос рельсів внаслідок їх анодної поляризації [21-23].

Найчастіше використовують автоматизовані установки посиленого електродренажу, які повинні відповідати вимогам таблиці 3.5.

Вибір типу (прямого, поляризованого або посиленого) і місця встановлення дренажу базується на синхронних вимірюваннях різниці потенціалів «споруда–земля» і «споруда–рельс» при експериментально–дослідних включеннях електродренажних установок.

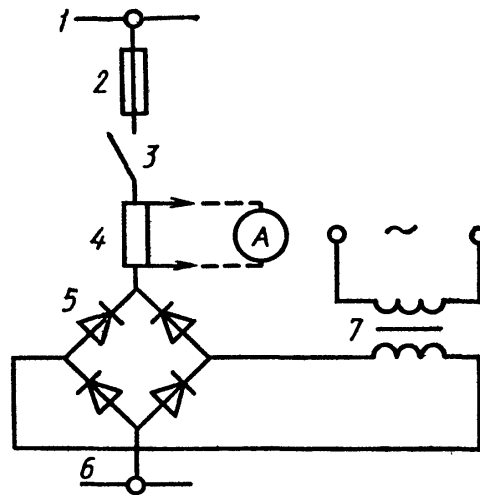


Рис.3.33. Принципова схема посиленого електродренажу:

1 – рельс; 2 – запобіжник; 3 – вимикач; 4 – шунт; 5 – випрямляч діод ний;  
6 – споруда; 7 – понижуючий трансформатор; А – амперметр.

Таблиця 3.5. Номінальні вихідні параметри установок посиленого електродренажу

Потужність, кВт	Сила випрямленого струму, А	Випрямлена напруга, В	Потужність, кВт	Сила випрямленого струму, А	Випрямлена напруга, В
0,6	50/100	12/6	2,5	200/400	12/6
1,0	80/160	12/6	3,0	250/500	12/6
1,2	100/200	12/6	4,0	330/660	12/6
1,6	130/260	12/6	5,0	415/830	12/6
2,0	165/330	12/6			

Пристрої дренажного захисту підключають тільки до тих джерел блукаючих струмів, які виявляють переважний вплив на об'єкт захисту. При цьому пристрої електродренажу заборонено підключати до рельсових шляхів у місцях стабільних анодних зон, а установки посиленого електродренажу до колій, прокладених у капілярно-пористих

середовищах без ізолюючого насипу (більшість трамвайних колій, колії в депо) щоб запобігти надмірно швидкої корозії та зносу рельсів.

### 3.4. Анодний захист

Анодний захист застосовують при експлуатації обладнання в середовищах з високою електропровідністю і виготовленого із матеріалів, що досить легко пасивуються – вуглецевих і низьколегованих нержавіючих сталей, титану, високолегованих сплавів на основі заліза. Анодний захист перспективний у випадку обладнання, виготовленого із різнорідних здатних до пасивації матеріалів, наприклад, нержавіючих сталей різного складу [19].

Для сповільнення швидкості корозії металу достатньо знизити швидкість хоча б однієї із електродних реакцій – анодного розчинення металу чи катодного відновлення деполяризатора. Основною характеристикою кінетики анодного і катодного процесу є їх поляризаційні криві – залежність анодної  $j_a$  та катодної  $j_k$  густин струму від потенціалу  $E$ . На рис.3.34 наведена узагальнена потенціостатична анодна поляризаційна крива. Область АВ називається областю активного розчинення. Спочатку швидкість розчинення росте експоненціально зі збільшенням потенціалу за рівнянням Тафеля. У перехідній області ВС відбувається пасивація метала, що веде до різкого сповільнення корозії. Потенціал максимуму струму називається критичним потенціалом пасивації  $E_{кр}$ , а відповідна йому величина  $j_a$  – критична густина струму пасивації  $j_{кр}$ . Область CD характеризується малими швидкостями корозії, що практично не залежать від потенціалу, і називається областю стійкого пасивного стану чи пасивної області. Пасивний стан обумовлений утворенням на поверхні металу тонких захисних плівок оксидної і сольової природи, а також адсорбційних шарів.  $E_n$  і  $j_n$  – потенціал і густина струму повної пасивації. При потенціалах, що перебільшують потенціал

перепасивації, спостерігається транспасивація DL. Тут швидкість розчинення знову росте внаслідок анодного перетворення речовини захисної плівки в розчинні сполуки вищої валентності чи у вищі оксиди з гіршими захисними властивостями. Перепасивація спостерігається для Cr, Fe, Ni, Mo, W і ряду інших металів. В області DL відбувається також анодне виділення кисню [20].

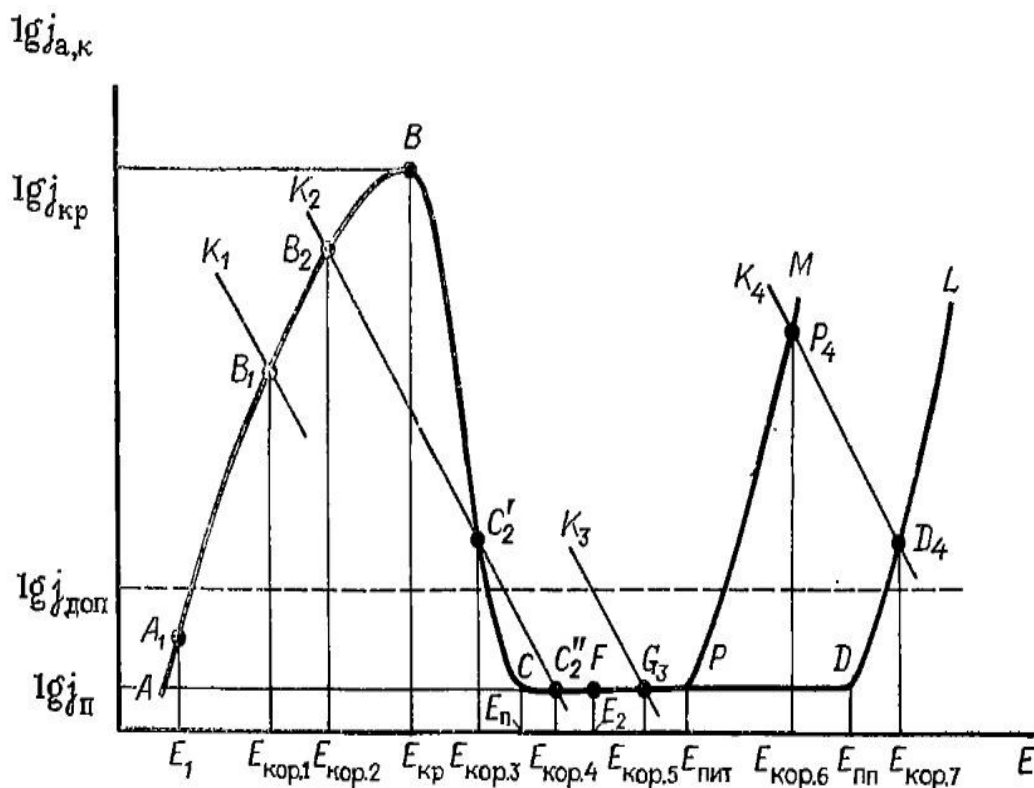


Рис.3.34. Узагальненна анодна потенціостатична поляризаційна крива для металу схильного до пасивації у відповідному середовищі

У залежності від здатності присутніх у розчині окисників до електрохімічного відновлення, відповідна цьому процесу катодна крива може по-різному розташовуватись відносно анодної кривої. Приклади чотирьох можливих випадків показано на рис.3.34 відрізками катодних кривих  $K_1$ – $K_4$ .

У випадку  $K_1$ , що часто відповідає реакції відновлення водню, потенціал корозії лежить в активній області анодної кривої. При цьому потенціал швидкості анодної і катодної реакцій рівні і відповідають точці  $B_1$ . Така корозійна система знаходиться в стійкому активному стані. Якщо змістити потенціал металу від  $E_{кор1}$  в область пасивності (наприклад, точку  $F$ ), поляризуючи метал анодно від зовнішнього джерела (зупиняючи поляризація) то буде досягнуто пасивний стан. Після зняття поляризації система самочинно повернеться до активного стану [20].

Крива  $K_2$  пересікається з анодною кривою в точках:  $B_2, C_2, C_2'$ . Такий випадок відповідає пасивно–активному стану корозійної системи, який характеризується тим, що система може знаходитись в двох стаціонарних станах: активно–стійкому (при потенціалі  $E_{кор2}$  в точці  $B_2$ ) із більшою швидкістю корозії чи пасивно–стійкому (при потенціалі  $E_{кор4}$  в точці  $C_2'$ ) із малою швидкістю корозії. Точка  $C_2'$  при потенціалі корозії  $E_{кор3}$  знаходиться в області нестійкого пасивного стану і зазвичай не реалізується. При потенціалах негативніших  $E_{кор3}$  система самовільно активується і її потенціал зміщується до  $E_{кор2}$ , а при більш позитивних потенціалах, чим  $E_{кор3}$ , – самочинно пасивується до  $E_{кор4}$ .

Крива  $K_4$  пересікається з анодною кривою в точці  $D_4$  в транс–пасивній області при потенціалі  $E_{кор7}$ , більш позитивному чим потенціал перепасивації  $E_{пп}$ . Цей випадок відповідає транспасивному стану системи, коли метал може знову розчинятись зі значними швидкостями.

У багатьох випадках при установленому потенціалі корозії швидкість корозії металу перевищує технічно допустимі для даної системи ( $j_a > j_{доп}$ , рис.3.34). У таких випадках для захисту від корозії необхідно знизити швидкість розчинення до прийнятної величини [20].

Зменшення швидкості корозії ( $j_a$ ) можна досягти зміщенням потенціалу металу, наприклад, від  $E_{кор1}$  до достатньо низького потенціалу

в активній області (наприклад, до  $E_1$ , точка  $A_1$ ) або в область пасивності (наприклад, до  $E_2$ , точка  $F$ ). Якщо зсув потенціалу в негативний напрям до ( $E_1$ ) здійснюється шляхом катодної поляризації від зовнішнього джерела, такий захист називається катодним. Зсув потенціалу в область пасивності ( $E_2$ ) шляхом анодної поляризації від зовнішнього джерела називається анодним захистом. Якщо катодну поляризацію здійснюють шляхом сполучення з протектором, маючи більш негативний потенціал, чим захищений метал, то такий захист називається катодно–протекторний захист (або просто протекторний), на відміну від анодно–протекторного захисту, коли анодна поляризація металу до потенціалів пасивності здійснюється шляхом з'єднання із протектором, що має більш позитивний потенціал, чим захищений метал. При анодному захисті від загальної корозії потенціал необхідно утримувати в межах пасивної області  $CD$ , протяжність якої в більшості випадків досить велика. Вихід за межі цієї області при анодному захисті неприпустимий, оскільки може привести до значного зросту швидкості розчинення металу ( $j_a \gg j_{\text{доп}}$ ). Для успішного захисту хімічного обладнання важиться достатнім протяжність області пасивності в інтервалі  $\Delta E \geq 50 \text{ мВ}$ . Правильний вибір інтервалу потенціалів дозволяє захистити метал не тільки від загальної, але і від деяких інших видів локальної корозії: корозійного розстріскування, піттингової міжкристалічної корозії [19, 27].

Для багатьох металів та сплавів, які пасивуються в середовищах, що містять активатори (іони  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{HS}^-$  і деякі інші), при потенціалах позитивніших потенціалу піттингоутворення  $E_{\text{піт}}$  (область  $PM$ , рис.3.34) відбувається порушення пасивного стану на окремих ділянках поверхні. Усереднена швидкість розчинення металу при установленому потенціалі корозії  $E_{\text{кор6}}$  (точка  $P_4$ ) пропорційна густині струму  $j_a$ , і при цьому буде відбуватись утворення пітингів. Для попередження піттингової корозії в

умовах анодного захисту потенціал металу необхідно утримувати в межах пасивної області  $E_{\text{пiт}}$  тобто протяжність області пасивності в присутності активатора зменшиться і стає обмеженою потенціалами  $E_{\text{п}}$  і  $E_{\text{пп}}$  (область СР). Величина  $E_{\text{пiт}}$ , як і всі характерні потенціали діаграми, залежать від багатьох факторів: природи металу і сплаву, концентрації активатора, рН, температури, режиму руху середовища, стану поверхні.

Міжкристалічна корозія (МКК) нержавіючих сталей відбувається при потенціалах, що відповідають області переходу в пасивний стан (область ВС) або області транспасивного стану (DL). Відповідно для попередження МКК достатньо утримати потенціал в області стійкої пасивності, тобто застосувати анодний захист.

На рис.3.35 наведені анодні поляризаційні криві для вуглецевої сталі в розчинах лугу. Штриховкою показана критична область потенціалів виникнення корозійного розтріскування (КР). Той факт, що КР відбувається переважно в обмеженій області потенціалів, дозволяє успішно застосувати анодний захист і для попередження КР хімічного обладнання [27].

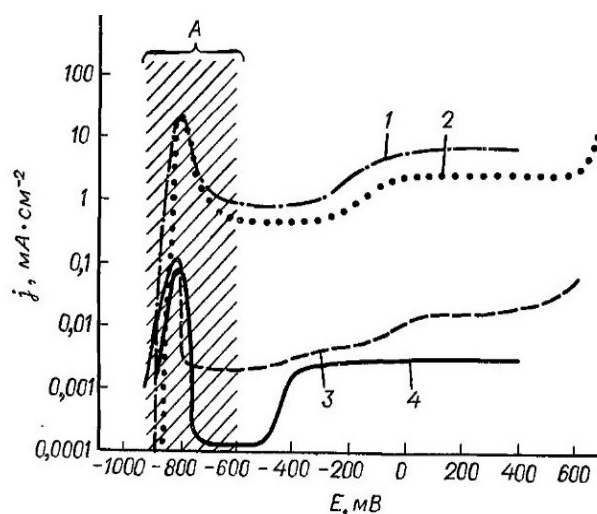


Рис.3.35. Анодні поляризаційні криві вуглецевої сталі в розчинах лугу:

1—киплячий 33% розчин NaOH з витримкою 60с на кожен вимір;



2– киплячий 35% розчин NaOH з витримкою 30с; 3– 35% розчин KOH з витримкою 30с при 80<sup>0</sup>С з витримкою 5 год; 3– 35% розчин KOH при 80<sup>0</sup>С з витримкою 5 год; 4– 20% розчин KOH 90<sup>0</sup>С; А– область корозійного розтріскування.

Отже, при анодному захисті потенціал активного металу, що розчиняється, зміщують у більш позитивну сторону до досягнення більш стійкого пасивного стану. У результаті відбувається не лише суттєве (в тисячі разів) зниження швидкості корозії металу, але і попереджається падавання продуктів його розчинення у кінцевий продукт хімічного синтезу. Зміщення потенціалу в позитивну сторону можна здійснити від зовнішнього джерела струму, введенням окисників в розчин або введенням в сплав елементів, що сприяють підвищенню ефективності катодного процесу, що протікають на поверхні.

Нижче наведено класифікацію методів переведення металу у пасивний стан (рис. 3.36) [27].



Рис.3.36. Методи введення металів у пасивний стан

Анодний захист, що здійснюється інгібіторами–пасиваторами, здійснюється за рахунок того, що в процесах їх відновлення виникає струм, достатній для переведення металу у пасивний стан. Як інгібітор можуть бути використані солі  $\text{Fe}^{3+}$ , нітрати, біхромати та ін. Застосування інгібіторів дозволяє захистити метал у важкодоступних місцях – щілинах, пазах. Недоліком цього методу захисту є забруднення технологічного середовища. Дія окисника на метал аналогічна дії анодної поляризації. При хімічній і електрохімічній обробці пасивний стан металу визначає лише величина потенціалу.

При анодному захисті методом катодного легування в сплав вводять добавки (часто благородний метал), на окремих фазах яких реакції відновлення деполаризаторів здійснюються з меншою перенапругою, чим на основному металі. Наприклад, в сплавах титану з невеликою кількістю паладію відбувається селективне розчинення титану, а поверхня безперервно збагачується паладієм. Паладій виступає як катодна фаза–протектор і пасивує сплав. Аналогічний ефект спостерігається і для хромистих сталей при введенні в сплав благородних металів.

Анодний захист від зовнішнього джерела базується на пропусканні струму через захищений об'єкт і на зміщенні потенціалу корозії в сторону більш позитивних значень. Установка для анодного захисту складається із об'єкту захисту, катоду, електроду порівняння і джерела електричного струму.

Основною умовою застосування анодного захисту є наявність протяжної області стійкої пасивності металу при густині струму розчинення металу не більше  $(1,5-6,0) \cdot 10^{-1} \text{ А/м}^2$  [20, 27].

Основним критерієм, що характеризує стан поверхні металу, є електродний потенціал. Зазвичай можливість застосування анодного

захисту для конкретного металучи сплаву визначається методом зняття анодних поляризаційних кривих. При цьому отримують наступні дані [27]:

- потенціал корозії металу в досліджуваному розчині;
- протяжність області стійкої пасивності;
- густина струму в обласкої пасивності;
- густину критичного струму пасивації;
- ефективність захисту ( $K_1/K_2$ ), яка визначається як відношення швидкості корозії без захисти  $K_1$  до шкидкості корозії із захистом  $K_2$ .

Зазначені параметри вимірюють у технологічному інтервалі температур, а також окремо досліджують вплив температури на ці параметри.

Як правило, параметри анодного захисту, отримані в лабораторних і промислових умовах, добре узгоджуються між собою. У залежності від конкретних умов експлуатації область захисних потенціалів при анодному захисті лежать в межах на 0,3...1,5В позитивніше потенціалу вільної корозії, а швидкість розчинення металів при цьому може зменшитись у тисячі разів.

#### **3.4.1. Технічні засоби анодного захисту**

Обов'язкові елементи анодного захисту (рис.3.37) катод 4, електрод порівняння 2 і регулюючий пристрій 3, що включає джерело постійного струму і регулятор потенціалу. У виняткових випадках, коли протяжність області стійкої пасивності доволі велика, анодний захист може здійснюватись за рахунок підтримання постійної напруги [27].

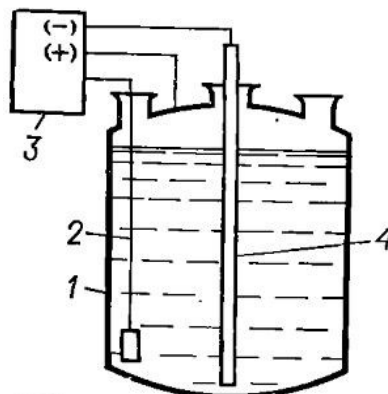


Рис.3.37. Схема апарату з анодним захистом:

1 – апарат; 2 – електрод порівняння; 3 – потенціостат; 4 – катод.

#### 3.4.1.1. Катоди для анодного захисту

Катод є одним із елементів триелектродної системи і відіграє важливу роль при анодному захисті металів. Корозійне руйнування катоду приведе до порушення всієї системи анодного захисту. Основні вимоги, які висувають до матеріалу катоду – висока корозійна стійкість, низька перенапряга катодної реакції, низька вартість матеріалу. Довгий час матеріалом катоду слугувала чиста платина. З метою економії часто застосовують катод, що являє собою метал-носій, покритий шаром платини (рис.3.38). Металом-носієм можуть бути срібло, мідь, бронза, нікель, залізо, свинець, латунь, титан. Вартість такого катоду складає приблизно 30% вартості системи анодного захисту. Розміри катодів невеликі, ось чому їх можна застосовувати в апаратах невеликого розмірів.

У концентрованій сульфатній кислоті як матеріал катоду використовують кремністий чавун – ферросилід С-15. Випробування показали високу корозійну стійкість такого катоду. У сірчаній кислоті знаходять застосування катоди із молібдена, сплаву 06ХН28МДТ, свинцю, танталу. Сплави Ti-Pt, Ti-Ta, Ti-Nb можна використовувати як катодні

матеріали в різних агресивних середовищах. В аміачних розчинах використовують аустенітну хромнікелеву сталь, сплав хастеллой. В лужному середовищі – нікель, вуглецеву сталь.

Проблема підбору катоду в анодному захисті включає також і вибір місця розташування його у технологічному обладнанні з тим, щоб забезпечити надійність конструкції при експлуатації в конкретних умовах. Бажано, щоб катод знаходився на рівній відстані від всіх частин поверхні апарату для рівномірного розподілення струму по всій поверхні, яка має бути захищена. У кожному конкретному випадку необхідно враховувати розсіювальну здатність розчину, примаючи до уваги місцеположення катоду, ширину зони пасивації, електропровідність тощо [20, 27].

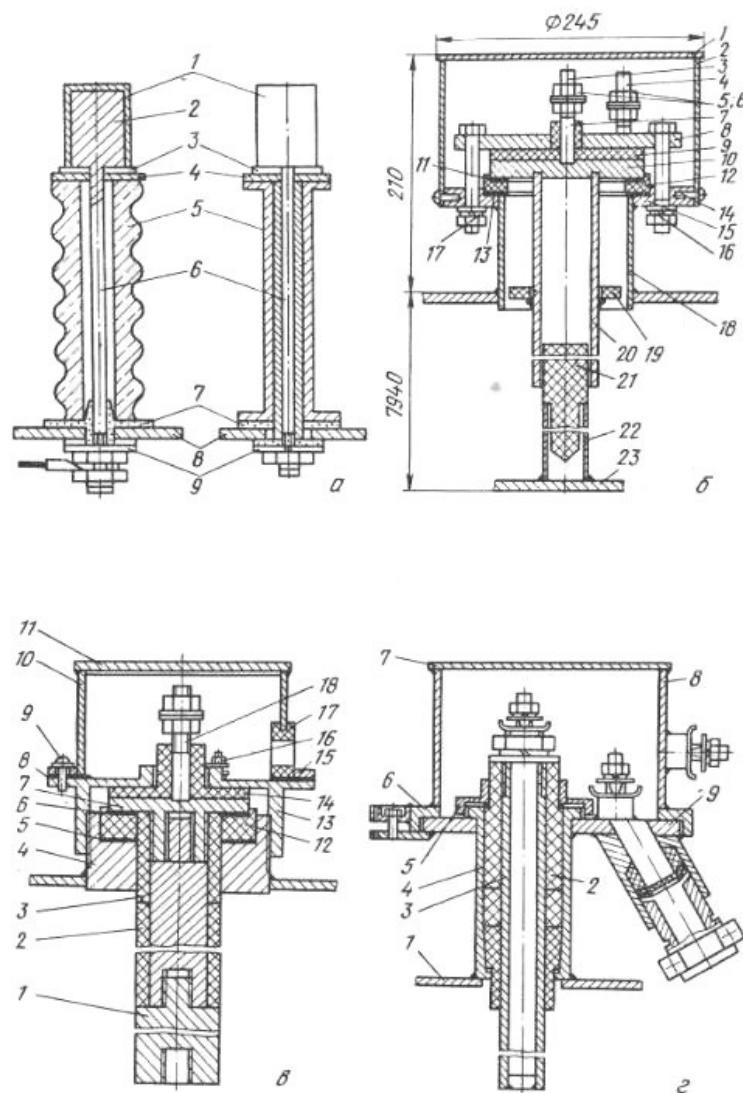


Рис.3.38. Катоди в промислових системах анодного захисту:

*a* – схема катоду в промисловій установці для анодного захисту:

1 – платинове покриття; 2 – латунний сердечник; 3 – платиновий диск;  
4,7 – тефлон; 5 – керамічна опора; 6 – латунний стержень; 8 – посудина;

9 – латунна шайба; *б* – вузол для горизонтального і вертикального розміщення катоду; *в* – вузол збірного катоду; *г* – електродний вузол вибухобезпечного виконання.

Хорошого розсіювання струму можна досягнути, застосовуючи два катода і більше. Таким чином, можна сказати, що для посудин, заповнених корозійним середовищем з хорошою електропровідністю, місце розположення катоду не відіграє важливої ролі. У випадку середовищ з низькою електропровідністю навпаки іноді вводять додаткові катода, які після введення металу у пасивний стан видаляють й для його підтримання використовують меншу кількість рідше розташованих катодів [20].

#### **3.4.1.2. Промислові електроди порівняння**

Контроль основного параметру захисту – потенціалу захисту, здійснюється за допомогою стаціонарних і підвісних електродів порівняння. Вони також служать датчиками потенціалу в автоматичних системах анодного захисту.

Відомі різні за природою і технічними характеристиками електроди порівняння. Загальною вимогою до них є – стабільність потенціалу у часі при зміні зовнішніх факторів та при регулюванні і підтриманні з заданою точністю необхідного захисного потенціалу металоконструкцій. Електроди порівняння розрізняють стаціонарні, встановлені для постійного використання в системі захисту, і переносні, призначені для періодичного контролю потенціалу захисту.

Електроди порівняння, що використовуються при анодному захисті хімічного обладнання, можна розділити на виносні і занурені (рис.3.39). Виносним може служити будь-який електрод порівняння, але частіше всього застосовують хлорсрібний і каломельний. Наряду з електродами, що випускаються серійно, наприклад для рН-метрії, в практиці анодного захисту використовують спеціально розроблені електроди порівняння.

Електродні потенціали таких електродів практично не відрізняються від розрахованих за рівнянням Нернста [21, 27].

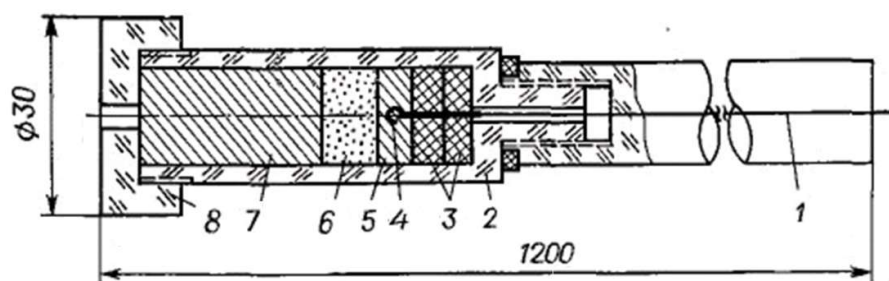


Рис.3.39. Занурений ртутно–сульфатний електрод порівняння:

- 1 – опора; 2 – корпус (фторпласт); 3 – гумові прокладки; 4 – платиновий дріт; 5 – ртуть; 6 – паста; 7 – капілярно–пористий матеріал (азбест);  
8 – фторпластова гайка з отвором.

Таблиця 3.6. Промислові електроди порівняння (занурені)

Тип електроду	Корозійне середовище/потенціал, в
Ртутно–сульфатний	10 і $\text{H}_2\text{SO}_4/0,60$ (н.в.е.) розчини гідроксиламіносulfата, 40– 100С
Нікель–фосфорний	Електроліт хімічного нікелювання, рН 4,5–5,5
Кремнієвий	Пульпа складних добрив
Оксидно–платиновий	$\text{NaOH}$ , %: 10, 20, 40/ – 0,105, – 0,095, – 0,20 (н.в.е..)
Оксидно–золотий	$\text{NaOH}$ , %: 10, 20, 40/ – 0,105, – 0,095, – 0,20 (н.в.е.) $\text{H}_3\text{PO}_4$ , %: 85, 95/0,090, 0,16 (н.в.е.)

Виносні або зовнішні електроди порівняння розміщуються в окремих посудинах і їх електролітичний контакт з агресивним середовищем забезпечується за допомогою ключа або моста. Виносні електроди порівняння найчастіше застосовують при анодному захисті апаратів, що працюють під тиском, при високих температурах або в



якихось інших естремальних умовах. Недоліком такої конструкції є необхідність використання електролітичного моста.

### 3.4.1.3. Промислові регулятори потенціалу

Для одночасного захисту кількох технологічних апаратів застосовують автоматичні системи анодного захисту. На багатьох підприємствах функціонує автоматична система захисту «Донець-12» (Рис.1.4) [19].

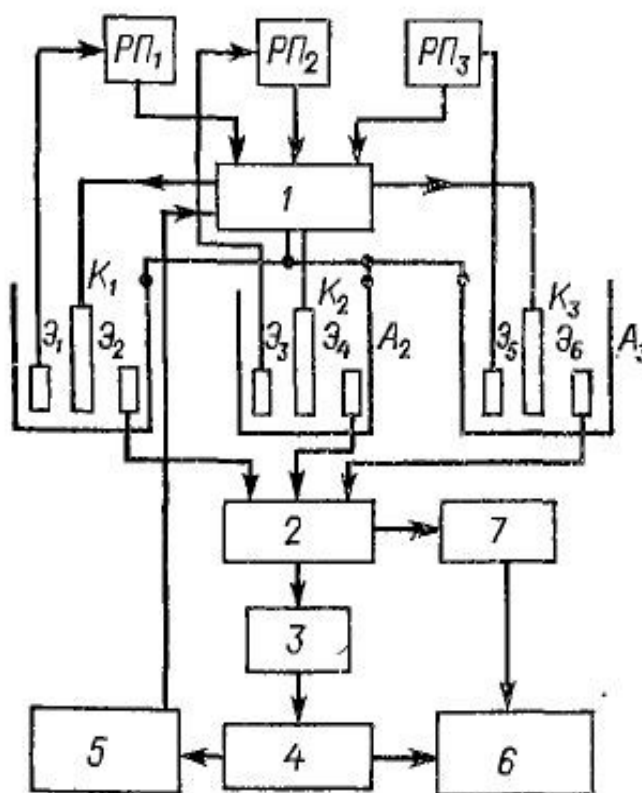


Рис.3.40. Блок-схема автоматичної системи анодного захисту:

- 1 – блок управління; 2 – оббігаючий пристрій; 3 – високомий перетворювач потенціалу; 4 – міліфольтметр; 5 – резервний регулятор потенціалу; 6 – блок сигналізації; 7 – логічний блок; РП<sub>1</sub>, РП<sub>2</sub>, РП<sub>3</sub> – регулятори потенціалу; А<sub>1</sub>, А<sub>2</sub>, А<sub>3</sub> – захищувані об'єкти; К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub>, К<sub>3</sub> – катоди; Є<sub>н</sub> – електроди порівняння.

Роботу систему захисту контролюють по потенціалу захищуваного об'єкта. У випадку виходу потенціалу із заданих меж відбувається автоматичне підключення до об'єкту резервного регулятора потенціалу. Передбачений також ручні переведення захищуваного апарату на резервне джерело струму.

Система забезпечує регулювання заданих потенціалів на всіх об'єктах захисту і автоматичний перехід на резервний блок регулювання, плавну установку захисного потенціалу та сили вихідного струму

### **3.4.2. Промислове використання анодного захисту**

Апарати, призначені для роботи з сірчаною кислотою, виготовляють із високолегованих сталей і футерують різними кислотостійкими матеріалами. Порушення футерування призводить до частих ремонтів та забруднення технологічного середовища продуктами корозії. Здатність вуглецевої і нержавіючих сталей до пасивації в сірчаноокислих середовищах дозволяє успішно застосовувати анодний захист для запобігання корозії. Крім того, застосування анодного захисту дає можливість замінити високолеговані сталі іншими менш дорогими сталями, а також позбутися футерування і тим самим збільшити корисний об'єм апаратів на 20–30% [20, 27].

Теплообмінники, які є найважливішим видом хімічного обладнання, виходять з ладу, головним чином, внаслідок корозії теплопередаючих поверхонь труб. Вони, як правило, експлуатуються в найбільш агресивних середовищах при високих температурах тисках і швидкостях матеріальних і теплових потоків, за умови ерозійного і абразивного впливу і т. п. Крім того, більшість теплообмінних апаратів мають складну конфігурацію і піддаються корозійному впливу як з боку корозійно-активного середовища, що охолоджується, так і з боку холодоагента (води). Заміна

металу хімічно стійкими полімерними матеріалами малоефективна, оскільки такі матеріали мають низьку теплопровідність. Повідомляється про невдалі спроби застосування перфторполіуретанових теплообмінників, що обумовлено саме низьким коефіцієнтом теплообміну.

У 1965 була досліджена можливість використання анодного захисту автомобільної цистерни, призначеної для перевезення концентрованої сірчаної кислоти. Випробування проводили протягом року. Обладнання для захисту складалось із транзисторного регулятора потенціалу, катоду (платинована латунь), електроду порівняння (окисно-платиновий) та джерела струму. Результатом застосування анодного захисту стало зменшення концентрації заліза для 93%-сірчаної кислоти до 2,5 мг/л, а для 99%-ої до 1,6 мг/л, при тому, що без захисту досягалося 10–15 мг/л. Таким чином накопичення заліза під час перевезення кислоти знизилось майже на порядок.

Анодний захист також застосовують для кислотозливних ван в текстильній промисловості. Під дією робочого розчину матеріал ванни, а особливо зварні шви, руйнуються. Значного зниження швидкості корозії можна досягнути введенням в кислотну інгібітора з одночасним застосуванням анодного захисту. Застосування анодного захисту в даному випадку веде до зменшення простоїв, а отже збільшення продуктивності, а також покращує якість отриманої продукції.

#### 4. ПАСИВНИЙ ЗАХИСТ МЕТАЛІВ

Ізоляцією металу від дії корозійного середовища можна забезпечити нанесенням металічних покриттів, фарбуванням, покриттям пластиком або керамікою, герметизацією, обгортанням, ізоляцією (ПХВ), нанесенням тимчасового захисту (масло, жирові композиції, що слугують для між операційного захисту) [1].

У першу чергу ізоляція матеріалу пов'язана із зміною складу поверхні. Ця зміна досягається шляхом додавання різноманітних матеріалів у вигляді зовнішньої оболонки. Для ідеального захисту необхідно повне видалення повітря, вологи і інших корозійних середовищ з поверхні виробів, що захищаються.

Так як індивідуальним покриттям дуже важко забезпечити повний захист то використовують в основному багатофазові комбінації розділювальних матеріалів у вигляді так-званих систем захисних покриттів, які поєднують у собі декілька видів покриттів, які доповнюють одне одного за властивостями.

Використання захисних покриттів рекомендується у тих випадках коли воно є більш економічно виправданим ніж використання корозійно стійких матеріалів. Основні вимоги для отримання оптимальних результатів при нанесенні захисних покриттів [19]:

1. Оптимальні геометричні форми для очищення поверхні нанесення покриття і періодичного контролю його цілісності.
2. Відомості про фізико-механічні властивості металу-покриття.
3. Використання різноманітних методів контролю нанесення і функціональності покриття.
4. Випробування на міцність адгезії одразу після нанесення.

## 4.1. Неорганічні покриття

### 4.1.1. Силікатні емалі

Силікатні емалі представляють собою наплавлені на метал скляні покриття з відповідним коефіцієнтом термічного розширення. Емаль у вигляді порошку (фрити) наносять на протравлену чи підготовлену іншим способом поверхню металу і нагрівають в печі до температур, що викликають розм'якшення емалі (Рис. 4.1).



Рис. 4.1. Фрити

Можна наносити декілька шарів покриттів. Емалі в основному наносять на сталь, однак деякі з них можуть бути нанесенні на мідь, латунь і алюміній.

Емалі, які в основному складаються з лужних боросилікатів, стійкі до дії сильних кислот чи слабких лугів або до обох типів сполук. Їх висока захисна здатність обумовлена непроникністю по відношенню до води і кисню, а також стійкістю до підвищеної температури. Такі покриття

можна застосовувати в резервуарах для гарячої води, які захищені катодною поляризацією. При одночасному електрохімічному захисті існування пор допускається, але за відсутності електрохімічного захисту в покритті не повинно бути жодних дефектів.

До основних недоліків таких покриттів відносять крихкість і розтріскування при теплових та механічних ударах.

Із часом відбувається старіння емалей, у покритті утворюються сітки тріщин, в яких з'являється іржа. Силікатні емалі використовуються також для захисту від газів при високих температурах, наприклад у вихлопних трубах літаків. У ґрунтах ці покриття мають тривалий термін служби [20].

#### **4.1.2.Покриття портланд–цементом**

До переваг цих покриттів відноситься низька вартість, близькість коефіцієнта розширення цементу і сталі ( $1,5 \cdot 10^{-5}$  град і  $1,2 \cdot 10^{-5}$  град відповідно) і легкість нанесення та ремонту. Ці покриття можна наносити методом центр обіжного лиття, ручним способом або напиленням. Зазвичай товщину покриттів вибирають від 0,5 до 2,5 см; при цьому більш товстіші покриття, як правило, армують дротовою сіткою [21].

Покриття портланд–цементом застосовують для захисту водопровідних труб із ливарного чавуну чи сталі від води чи ґрунту або від того і іншого одночасно. Окрім цього такі покриття наносять на внутрішню поверхню резервуарів для гарячої або холодної води, нафтосховищ і ємностей для зберігання хімічних продуктів. Їх, також, використовують для захисту від корозії в морській чи джерельній воді (Рис. 4.2).



*Рис. 4.2.Захисне покриття металевої труби портланд-цементом*

Недоліки цих покриттів пов'язані з їх чутливістю до руйнування при механічних чи теплових ударах. Однак, у відкритих резервуарах можна легко усунути дефектні ділянки в покритті, замазуючи їх свіжими порціями цементу.

#### **4.1.3.Покриття, отримані хімічною обробкою металу**

До них відносяться покриття, що утворюються в результаті хімічної взаємодії безпосередньо на поверхні металу. Сюди входять такі покриття, як  $\text{PbSO}_4$ , що утворюється при витримці свинцю в сірчаній кислоті, або фторид заліза, що утворюється в сталевих контейнерах фтористоводневої кислоти (конц.  $> 65\%$  ваг.) [19-22].

**Фосфатні покриття** на сталі отримують нанесенням щіткою або напиленням на чисту поверхню сталі холодних чи гарячих розбавлених розчинів ортофосфорної кислоти і ортофосфатів марганцю чи цинку (препарат МАЖЕФ) (Рис. 4.3).

При наступній реакції утворюється сітка пористого кристалічного фосфату металу, що добре зчеплений з поверхнею металу.

У деяких випадках в розчині для фосфатування з метою прискорення процесу додають прискорювачі, наприклад йони міді, хлорату чи нітрату.



Рис. 4.3. Фосфатування металу для захисту від корозії

Самі по собі оксидні покриття не забезпечують достатнього захисту від корозії. Їх використовують в основному як попередню підготовку під фарбу, що підвищує її адгезію зі сталлю і зменшує корозію в місцях подряпин. Іноді фосфатні покриття просочують різними маслами чи воском, що захищає від корозії.

**Хроматні покриття.** Їх наносять на цинк зануренням очищеного металу на декілька секунд в розчин біхромату натрію, підкисленого сірчаною кислотою при кімнатній температурі з наступним промиванням і висушуванням. При цьому утворюється поверхневий шар хромату цинку, що має жовтуватий колір і захищає метал від появи плям під дією конденсованої вологи. Цей шар також дещо підвищує термін служби цинку в атмосферних умовах. Подібні покриття також рекомендовані і для нанесення на кадмій [19-22].



#### 4.1.4.Оксидні покриття

Такі покриття на сталі можна отримати контрольованим високотемпературним окисленням у повітрі або зануренням в гарячі концентровані розчини лугів, що містять персульфати, нітрати чи хлорати. Такі покриття, так як і фосфатні, не захищають від корозії. При обробці інгібованими маслами чи воском досягається деякий захист.

Оксидні покриття наносять на алюміній при кімнатній температурі анодним окисненням алюмінію у відповідному електроліті, наприклад у розбавленій сірчаній кислоті при густинах струму  $1 \text{ А/дм}^2$  (рис.4.4). Цей процес називається анодуванням. При цьому утворюється плівка оксиду алюмінію товщиною від 0,0025 до 0,025 мм. Отриманий таким способом оксид можна гідратувати для покращення його захисних властивостей, витримуючи анодовані вироби у водяній парі чи гарячій воді впродовж декількох хвилин. Анодування забезпечує гарну основу для нанесення фарб на алюміній [19-22].



Рис. 4.4. Оксидування металу для захисту від корозії

## **4.2. Органічні покриття**

### **4.2.1. Фарби**

Фарби – це суміш нерозчинних частинок пігменту, що зважені в однорідному органічному зв'язуючому. Пігменти зазвичай складаються з оксидів металів, наприклад  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , або інших сполук, таких як  $\text{ZnCrO}_4$ ,  $\text{PbCO}_3$ ,  $\text{BaSO}_4$ . Зв'язуючим можуть бути природні олії, включаючи лляну і тунгову олію. Ці олії на повітрі окислюються і полімеризуються до твердого стану, причому цей процес можна пришвидшити за допомогою невеликих кількостей каталізаторів, таких як свинцеве, марганцеве чи кобальтового мила. Сьогодні для роботи в умовах постійного контакту з водою, часто використовують синтетичні смоли. Ці смоли висихають або внаслідок випаровування розчинників, в яких вони розчинені, або у результаті полімеризації при нагріванні чи додаванні відповідних каталізаторів. Масляні лаки зазвичай складаються із суміші олії, що швидко висихає, розчинених смол і леткого розбавника. Лаки складаються з розчинених смол і леткого розбавника. У деяких випадках вони також вміщують пігменти.

Прикладом синтетичних смол, що застосовуються в покриттях можуть слугувати фенол–формальдегідні смоли, які витримують дію води при температурах кипіння і навіть дещо вище. Ці смоли використовують в хімічній промисловості у вигляді багатошарових покриттів гарячого сушіння, стійких в багатьох агресивних середовищах. При підвищених температурах застосовують також силіконові смоли [19-22].

#### **4.2.1.1. Нанесення лакофарбових покриттів**

Для досягнення хорошої адгезії ґрунтовний шар слід наносити на суху поверхню металу можливо швидше після його очищення. Ще краще спочатку захистити метал фосфатним покриттям; у цьому випадку за

необхідності може бути допущене деяке зволікання з нанесенням ґрунтового шару.

Фосфатні покриття покращують зчеплення фарби з металом і запобігають «підриванню» плівки у подряпинах та інших місцях дефектів фарби, де утворюється іржа, яка поширюється під шаром органічного покриття. На практиці протягом багатьох років корпуси електричних приладів і кузови автомобілів перед фарбуванням фосфатують (Рис. 4.5).



Рис. 4.5. Нанесення лакофарбових покриттів на металеві конструкції

Лише у виняткових випадках фарбу можна наносити на мокру чи вологу поверхню. В результаті отримують погане зчеплення фарби зі сталлю. Після висихання першого шару можна наносити або другий ґрунтовний шар, або верхні шари покриття. Чотиришарові покриття із загальною товщиною не менше 0,13 мм рекомендується як мінімальне для захисту сталі від корозії у агресивних атмосферах.

Вимоги до лакофарбових покриттів:

1. Стійкість фарби до даного корозійного середовища
2. Можливість використання методу нанесення, який характерний для даної групи лакофарбових матеріалів
3. Затрати праці на нанесення і порівняльна оцінка вартості різних методів нанесення.

4. При виборі захисного покриття слід надавати перевагу покриттям, які наносяться безпосередньо при виготовленні конструкційних матеріалів перед покриттями, що наносяться після часткового або повного збирання об'єкта.
5. По можливості слід використовувати покриття пластиками або поєднання покриття пластиків і металізації [19-22].

#### **4.2.1.2.Травильна ґрунтовка**

Була розроблена у 20ст. для полегшення процесу фарбування алюмінію. В подальшому її почали застосовувати у якості ґрунтового шару для сталі і деяких інших металів. Для приготування травильної ґрунтовки змішують два розчини. Перший розчин з пігментом містить 9% полівінілбутиралу і 9% тетраоксихромату цинку, що розчинені в суміші ізопропанолу і бутанолу, а другий компонент суміші – це 18%-ий розчин 85%-ої ортофосфатної кислоти в ізопропанолі та воді. Перший і другий розчини змішують у співвідношенні 4:1. Суміш повинна бути використана протягом 8–24 год. з моменту отримання. Перевага подібної обробки закладається у поєднанні двох операцій: фосфатування металу і нанесення ґрунтового шару. Це покриття добре зарекомендувало себе в якості ґрунтового шару на сталі, цинку(оцинкована сталь), і алюмінію.

#### **4.2.2. Вінілові смоли**

Вони володіють хорошою стійкістю у воді та в лугах, що робить їх придатними для захисту споруд, що захищені катодною поляризацією. Фарби на основі лляної та тунгової олії в цих умовах непридатні, оскільки під дією лужних продуктів, що утворюються на катоді, швидко омилуються і руйнуються при роботі у воді і в ґрунті.

#### 4.2.3.Епоксидні смоли

Стійкі в лугах, а також в багатьох інших хімічних середовищах. Властивість, що їх відрізняє – хороша адгезія з поверхнею основного металу, що пояснюється існуванням у молекулі багаточисленних полярних груп. Ці смоли слугують основою пластичних замазок, які при додаванні відповідного каталізатора швидко тверднуть, що робить їх зручним матеріалом, наприклад, для замазування протікання в трубопроводах з чорних і кольорових металів.



Рис. 4.6. Епоксидний захист металевих труб

Фарби не можна використовувати для захисту підземних споруд, оскільки тонкі покриття легко пошкоджуються при контакті з ґрунтом і термін їх служби відносно малий. Більш дешеві товстошарові покриття кам'яновугільною смолою в цих умовах виявилися значно більш доцільні. Звичайні фарби на основі лляної і тунгової олії також не забезпечують надійного захисту металічних споруд, частково занурених у воду. Вони застосовуються для короточасного захисту протягом не більше 1 року. У гарячій воді термін служби таких фарб ще менший [19-22].

Більш надійний захист протягом декількох років при експлуатації за звичайних температур досягається при нанесенні 4 чи 5 шарів фарби на основі синтетичного зв'язуючого. Внаслідок дороговизни подібних

багатошарових покриттів у багатьох випадках для роботи в прісній чи морській воді замість них застосовують товстошарові покриття кам'яновугільною смолою. Переважна більшість фарб більше всего підходить для захисту металів від атмосферної корозії.

#### **4.2.4. Облицювання пластмасами**

Накладанням товстих листів із пластмас чи резини на сталю поверхню можна досягти захисту від корозії в кислотах, лугах та інших агресивних рідинах та газах. До таких матеріалів відносяться, наприклад, резина, неопрен и «Саран» (1,1 дихлоретилен). При товщині листа 3 мм чи більше забезпечується відносно надійний дифузійний бар'єр і досягається захист основного металу від корозії протягом тривалого часу. Висока вартість таких покриттів обмежує їх використання.

При захисті підземним металічних споруд застосовують обмотування вінілпластом чи поліетиленом у вигляді липкої ізоляційної стрічки. На практиці такі стрічки широко використовуються для покриття, що стикається із ґрунтом труб і допоміжного обладнання. Один із найбільш стійких пластиків в широкому діапазоні хімічних середовищ – тетрафторетилен (тефлон). Цей матеріал не руйнується під дією царської горілки і киплячих концентрованих кислот, включаючи сульфатну, нітратну і фторидну. Він стійкий також, в киплячих концентрованих лугах, газоподібному хлорі і в усіх органічних розчинниках до температур близько 250°C. Він вступає у взаємодію лише з елементарним фтором і розплавленим натрієм. У фторидній кислоті і фторованих вуглеводнях при температурі вище 200°C починається повільне руйнування цього пластику з утворенням суміші газів високої токсичності. Токсичні гази можуть також виділятися при нагріванні в процесі механічної обробки [19-22].

Міцність тefлону, як і будь-якого пластику, невелика; він легко підлягає пластичній деформації під навантаженням. Його надмірна інертність ускладнює його нанесення на будь-яку поверхню. Цей матеріал в основному використовується для футерування, виготовлення прокладок і мембранних клапанів.

#### **4.3. Захист заліза від корозії покриттями з інших металів**

Існує два типи металевих покриттів — **протекторні** (покриття цинком, алюмінієм і кадмієм) і **корозійностійкі** (покриття сріблом, міддю, нікелем, хромом і свинцем). Перша група металів має негативний потенціал по відношенню до заліза, друга — позитивний. Найбільше поширення в побуті отримали металеві покриття заліза оловом (біла жерсть, з неї роблять консервні банки) і цинком (оцинковане залізо — покрівельне покриття), що отримуються шляхом протягування листового заліза через розплав одного з цих металів.

Часто цинкуванню піддаються чавунна й сталева арматура, а також водопровідні труби — ця операція істотно підвищує їх стійкість до корозії, але тільки в воді до 70 °С.

Алюмінієве покриття. Цей метал має малу питому вагу, а значить — менше витрачається, алюмінієві поверхні можна фарбувати і шар лакофарбового покриття буде стійкий. Крім того, алюмінієве покриття в порівнянні з оцинкованим покриттям володіє більшою стійкістю в агресивних середовищах [19-22].

Олов'яні покриття використовують в електротехніці для полегшення здатності до пайки і в харчовій промисловості через не токсичність. Для захисту від корозії пружинних деталей рекомендується використання органічних або металічних покриттів, нанесених методом вакуумного

напилення. Для зменшення ерозійного руйнування пластиків у сильно–агресивних середовищах рекомендується нанесення гальванічного нікелю.

Хімічно стійкі композиції на основі скла використовують для виготовлення та покриття нагрівальних елементів у калориферах, а також для захисту змієвиків нагріву. Деталі, що постійно занурені в мастила, які містять інгібітор не потребують додаткового захисту, на відміну від тих, що піддаються періодичному зануренню, або частково занурені в агресивний розчин.

Для захисту напружених сталевих деталей, які працюють в умовах підвищеного тиску і низьких температур рекомендується захисні покриття із пластику, що нанесений із розплаву. Також пластикові покриття використовують для захисту від кавітаційної корозії.

За оптимальних умов фторопластове покриття забезпечує захист від корозії, електронейтральність і хімічну інертність а також здатність до самоочищення. При катодному захисті необхідно враховувати, що нерівна поверхня із сталі і мідних сплавів потребує значно меншої густини захисного струму.

При виборі покриття необхідно провести аналіз вимог до цього покриття. До таких факторів оцінки відносять [19-22]:

1. Яке поєднання металу–покриття і основи зможе забезпечити оптимальну пористість і контактний ефект.
2. Чи буде металпокриття змінювати властивості основи.
3. Чи можна з допомогою покриття досягти бажаних фізичних і хімічних властивостей поверхні при прийнятних затратах і чи можна реалізувати оптимальну технологію нанесення.
4. Який із методів нанесення покриття зможе забезпечити більшу частину з наведених.



Вимоги до процесу електроосадження:

1. Які хімічні і фізичні властивості повинно мати покриття і який склад покриття може їх забезпечити.
2. Необхідна товщина покриття.
3. Твердість покриття
4. Методи зниження внутрішніх напружень
5. Вимоги до підготовки поверхні перед нанесенням покриття
6. Вплив електроліту на основу
7. Який із методів нанесення буде найбільш оптимальним.

Вимоги до покриттів, що наносяться зануренням:

Цинк (+450 °C), олово–свинець, алюміній.

1. Чи можна нанести покриття на об'єкт
2. Вплив навколишнього середовища і умов нанесення на основу і склад утворюваного покриття
3. вибір оптимальної товщини і ваги покриття
4. вплив послідовних операцій на товщину і властивості покриття
5. чи необхідна буде додаткова обробка отриманого покриття для покращення його фізико–механічних властивостей.
6. Необхідно врахувати можливість або необхідність нанесення лако–фарбового покриття для забезпечення оптимального захисту.

## РОЗДІЛ 5 КОМБІНОВАНИЙ ЗАХИСТ МЕТАЛІВ

Досягнення найбільшої ефективності захисту техніки можливо одночасним застосуванням декількох методів або засобів захисту [28].

Методи і засоби активного і пасивного захисту в певних поєднаннях для тих чи інших умов експлуатації можуть забезпечити необхідний ефект. У кожному конкретному випадку аналіз вибору системи захисту повинен бути виконаний на стадії проектування конструкцій з урахуванням умов експлуатації і статистичних даних по довговічності (зберігання) машин, обладнання та споруд попередніх поколінь.

При цьому необхідно враховувати допустимість контактів металів в певних середовищах. У переважній більшості випадків застосовують електрохімічний захист спільно з захистом ізоляційними покриттями. Спроби використовувати електрохімічний захист для неізольованого споруди приведуть до невиправданих витрат електроенергії і анодного матеріалу.

Дійсно, при електрохімічному захисті ізольованої споруди струми захисту будуть розподілятися лише по тріщинах і проколах в ізоляції, що різко знизить витрати на електроенергію. Токи ЕХЗ, таким чином, "заліковують рани ізоляції", які вона отримує в процесі будівництва і експлуатації споруди. До того ж в порах і тріщинах ізоляції при електрохімічному захисті утворюється сольовий осад, який "пломбує" пошкодження. Саме завдяки такій дружності повсюдно застосовується комплексний захист – ізоляційні покриття в поєднанні з ЕХЗ [20].

### 5.1. Комбіновані покриття

Ефективними є комбіновані покриття, що представляють собою системи плівок (металевих і неметалевих), що включають один або кілька шарів, компонентів або фаз [29].

До комбінованих однофазних твердих покриттів відносять системи, що складаються з однокомпонентних багат шарових покриттів (наприклад, нікель матовий – нікель блискучий; мідь з ціаністої ванни – мідь з кислої ванни, багат шаровий хром, отриманий з електроліту при різних режимах), і багатоконпонентні системи, що складаються з одного або декількох шарів, що включають один або кілька твердих компонентів.

Залежно від будови комбіновані однофазні покриття можуть бути поліметалічними (нікель – хром, мідь – нікель – хром), металоконверсійними (кадмій – хромат, нікель – оксид), металополімерними (цинк – лакофарбові покриття), граничними (хром – олово), змішаними ( мідь під граничним шаром хром – олово) і композиційними (метал з включеними частинками полімеру, метал з включеними частинками оксидів металу, полімер з частинками металу, лакофарбові покриття з частинками металу) [30].

Різновидом комбінованих покриттів є тверді пористі покриття з твердими або твердіючими за нормальних умов, наповнювачами (наприклад, металеві або конверсійні покриття з полімерними або гідрофобізуючими наповнювачами).

До комбінованих двофазних покриттів відносять системи, що включають тверді покриття, на поверхні яких є шар консерваційних, експлуатаційних масел або гідрофобізуючих рідин; тверді пористі покриття з наповнювачем з гідрофобізуючих рідин і їх емульсій; рідкі покриття (консерваційніта експлуатаційні мастила) з твердими частинками (наприклад з частинками дисульфиду молібдену) або з легколеткими речовинами (ЛЛР), наприклад леткими інгібіторами корозії, фунгіцидами, речовинами універсального дії (РУД); тверді пористі покриття з наповнювачем ЛЛР (інгібітори, фунгіциди, РУД), що утворюють над

поверхнею захисну газоподібну зону; покриття з ЛЛВ, що тверднуть за нормальних умов.

До комбінованих трифазних покриттів відносять системи, що включають тверді покриття, на поверхні яких є шар гідрофобізуючих рідин, що містять ЛЛР (інгібітори, фунгіциди, РУД); тверді пористі покриття з рідким наповнювачем і ЛЛР; рідкі покриття з твердими частинками і ЛЛР [31].

Комбіновані покриття з ЛЛР ефективні при експлуатації в специфічних умовах (в замкнутих обсягах з газоподібними середовищами), наприклад при герметизації і ампулізації об'єкта захисту або в обсягах з обмеженим обміном газоподібного середовища. В таких умовах створювана у поверхні виробу зона, за допомогою сублімую чого ЛЛР запобігає корозії металів, старіння полімерів і мікробіологічному руйнуванню.

Дво- і трифазні комбіновані покриття відносяться до складних, а поєднання багат шарових комбінованих покриттів з конверсійними дає змішані комбіновані покриття.

Багат шарові комбіновані покриття (БКП) можуть бути монометалічні, метало конверсійними, конверсійно-полімерними, граничними. До них можнатакож віднести лакофарбові покриття. Дуже розповсюдженими БКП є багат шарові монометалічні покриття. Вони мають підвищену захиснудію в результаті зниження пористості без збільшення товщини покриття. Багат шарові монометалічні покриття широко застосовують для захисту виробів з вуглецевих і легованих сталей від атмосферної корозії в звичайних умовах експлуатації [29].

Комбінований захист техніки від корозії повинна передбачати розумне поєднання методів впливу на метал і середу. Ускладнення і різноманітність методів комбінованого захисту веде до їх подорожчання і

повинно мати достатнє обґрунтування. Загальним принципом повинні бути спрощення методів і вибір найбільш оптимального варіанту їх використання. Це можливо при аналізі чинників середовища в кожному конкретному випадку і визначенні моделей процесів.

Для запобігання корозійних процесів в агресивних середовищах необхідно: виключити операції, які призводять до зміни складу агресивних речовин, так як матеріал не розрахований на підвищення їх корозійної активності; оцінити відповідність корозійної стійкості металу агресивності впливають середовищ; передбачити контроль аустенітних сталей на схильність до МКК, контроль режиму зварювання і термообробки в умовах експлуатації і ремонту, своєчасну заміну елементів конструкцій, що мають схильність до МКК або схильних до МКК в початковій стадії.

Необхідно також продовжити пошук нових матеріалів, що дозволяють зберігати міцність аж до температур плавлення, нечутливість до концентраторів напружень, а також корозійну стійкість в розчинах агресивних речовин і їх парів і високі технологічні властивості (зварюваність перспективними видами зварювання, здатність до паяння, деформаційних здатність, різанням та ін.) [29].

Доцільно вдосконалювати технологічні операції складання конструкцій устаткування, механічну обробку поверхні, що дозволяє знизити кількість макро— і мікродефектів і виключити виникнення напруження, проводити локальну термообробку швів, наприклад, струмами високої частоти, а також за— захищатися ділянки, ослаблені в корозійному відношенні (стики, зварні шви, контакти різнорідних металів і т. п.), наприклад, фторопластовим покриттями Загальним заходом щодо запобігання корозійних процесів в результаті впливу факторів, що характеризують стан матеріалу вузла, системи, машини в цілому, є раціональне конструювання [32].

Ознаки раціонального конструювання [32, 33]:

- відповідність корозійної стійкості металів і захисної здатності покриттів агресивності середовищ в процесі експлуатації;
- відсутність ділянок, що сприяють накопиченню вологи і важкодоступних для контролю;
- мінімум рознімних з'єднань;
- рівномірність обробки поверхні вузла і уніфікація захисту деталей від впливають середовищ;
- відсутність різких переходів при сполученні поверхонь, глибоких проточек і отворів,
- відсутність контакту різнорідних металів і металів з полімерами або ізоляція таких ділянок поверхні,
- рівномірність навантажень на елементи конструкції з метою виключення корозійно–втомлювальних явищ;
- застосування ємностей оригінальних конструкцій, що виключають вплив фазових складових агресивних продуктів;
- можливість виконання протикорозійних заходів в процесі експлуатації (видалення продуктів корозії, відновлення покриттів, застосування засобів і способів додаткового захисту);
- можливість заміни елементів конструкції в умовах експлуатації і при ремонтно–технічному обслуговуванні без великих матеріальних витрат і зниження вимог до експлуатаційних характеристик.

Для забезпечення рівномірного ламінарного руху потоку робочого середовища необхідно мати правильну аеродинамічну форму апарату (трубопроводу), не допускати різких вигинів труб, забезпечувати плавні переходи, застосовувати клапани великих розмірів, зменшувати число роз'ємних з'єднань, не застосовувати підкладкових кілець, що звужують перетин, і т. п.

Для захисту металевих і залізобетонних конструкцій від підземної корозії застосовують різні методи, що включають вплив на корозійну середу, метал, ізоляцію металу від середовища, катодний, протекторний захист і заміну металів неметалевими матеріалами [32].

Вплив на корозійне середовище укладено в заміні корозійно-активного ґрунту менш активним, наприклад Гумбіннен (глиною спеціального складу), зниженні агресивності ґрунту (вапнування кислих ґрунтів, інгібування і ін.), гідрофобізування ґрунтів. Ці методи малоефективні і дорогі.

Вплив на метал складається в легуванні металу. Метод застосовують на стадії виготовлення металевих і залізобетонних конструкцій, і він може бути розглянутий при конструюванні споруд, які передбачають експлуатувати в ґрунтах з високою корозійною активністю.

Ізоляцію металу від середовища доцільно розглядати стосовно металевій арматури і метало-гідроізоляції окремо ізоляцію металевій арматури в бетоні здійснюють ущільненням останнього. Цього можна досягти механізованим бетонуванням, наприклад, пневматичним способом [20].

Особливу увагу слід звернути на закладення стиків між бетонними тубінгами. Застосовують, наприклад, проникаючі швидкотверднучі склади герметиків на основі різних полімерних матеріалів. Крім того, в цементні суміші перед бетонуванням доцільно вводити спеціальні добавки. Останні повинні також володіти поліфункціональними властивостями і забезпечувати прискорення твердіння цементу; кероване, узгоджене зі збільшенням міцності розширення цементного каменю; регулювання схоплювання і пластифікуючий ефект; високу анодну поляризаційність сталі, стабільну в присутності хлоридів, ефективність

катодного процесу, достатню для підтримання корозійного потенціалу в області пасивації.

Металеву гідроізоляцію захищають комбінованими покриттями, що включають металеві, конверсійні і лакофарбові покриття. Вони повинні відповідати наступним вимогам: бути тривалий період вологонепроникними і гідрофобними; володіти низьким поглинанням води, бути хімічно стійкими і перешкоджати проникненню іонів  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  та ін., прискорюють корозійні процеси; протистояти осмосу і електроосмосу; володіти діелектричними властивостями; мати достатню міцність, адгезію з урахуванням можливих деформацій при транспортуванні, будівництві та експлуатації; володіти стійкістю до високих і низьких температур і їх перепаду; мати достатню суцільність і рівномірність; проявляти стійкість до чинників впливаючих біопшкоджень; не містити компонентів, які надають корозійний вплив на метал; включати інгібітори корозії і фунгіциди; допускати нанесення додаткових засобів захисту в умовах експлуатації [19].

Залежно від активності ґрунту застосовують покриття: нормальні, посилені і дуже посилені. Для захисту металогідроізоляції рекомендується використовувати покриття на основі кам'яновугільних і епоксидних смол.

До застосування катодного і протекторного захисту заглиблених в ґрунт споруд треба підходити обережно. Необхідність використання цих методів захисту повинна бути ретельно проаналізована, технічно і економічно обґрунтована. Застосування електрохімічної (катодного) захисту пов'язане зі значними економічними витратами на будівництво спеціальних споруд і подальший витрата електроенергії. У деяких ґрунтах застосування електрохімічного захисту може стимулювати процеси корозії і біопшкоджень. Катодний захист доцільно використовувати, коли інші методи неприйнятні.



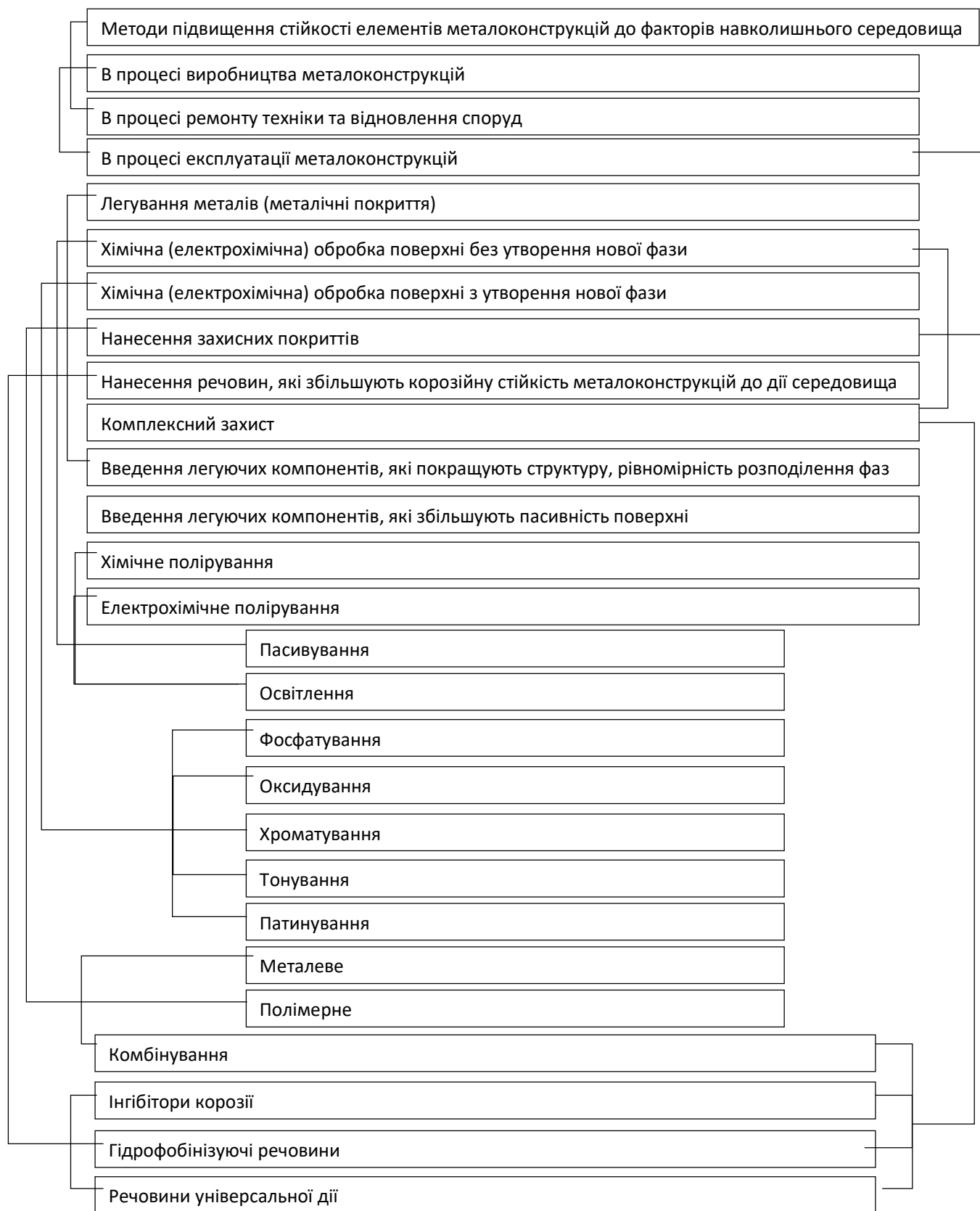


Рис. 5.1. Схема варіантів комбінованого захисту від корозії

## **5.2.Основні положення системного підходу при реалізації заходів з комплексного захисту**

Необхідність вдосконалення та підвищення ефективності методів захисту машин, обладнання та споруд від корозії, старіння і біопшкоджень обумовлена збільшенням металомісткості виробів та впливом процесів корозійного руйнування у економічній та екологічній площинах.

Протекторний захист рекомендується застосовувати, коли здійснення катодного захисту технічно утруднено і досяжний істотний економічний ефект [20].

Метод збереження підземних конструкцій від корозійних руйнувань заміною металів на неметалічні матеріали поки що недостатньо вивчений та потребує встановлення та проведення великого об'єму спеціальних досліджень [28].

Поєднання перерахованих методів для захисту від корозії обладнання в досить активних середовищах, а будівельних і заглиблених споруд від атмосферної, біологічної та ґрунтової корозії представляє комплексний захист (рис. 5.1). Варіант захисту в кожному конкретному випадку може бути вибраний з аналізу умов експлуатації, наявності моделі процесу і вимог до експлуатаційних характеристик конструкцій [32].

- ускладненням конструкцій техніки і споруд, нововведених в експлуатацію;
- жорсткістю умов експлуатації; появою специфічних забруднень повітря (наприклад, продуктів згоряння палив, інгредієнтів легколетких органічних речовин, що виділяються в навколишній простір при старінні полімерів ЛКП, інших забруднень атмосфери);

- локалізацією процесів руйнування в результаті нерівномірного розподілу забруднень по поверхні виробів, наявності застійних зон, щілинних ефектів, контактів різнорідних матеріалів;
- застосуванням полімерів з недостатньою стабільністю і низькою біостійкістю, а також покриттів зі слабкою захисною здатністю;
- підвищенням вимог до працездатності, зберігання і довговічності складних систем;
- збільшенням міжремонтних періодів і тривалості експлуатації машин і споруд в цілому.

Удосконалення методів захисту від корозії, старіння і біопшкоджень необхідно на всіх стадіях: проектування, виробництва і експлуатації техніки і споруд. Воно можливо в наступних напрямках:

- впливом на середовище (поліпшенням умов експлуатації, проведення профілактичних заходів з очищення навколишнього середовища і поверхні металоконструкцій від забруднень і мікроорганізмів; введенням ефективних летючих і адсорбуючих твердими поверхнями інгібіторів корозії і біоцидів) [2];
- впливом на матеріали і захисні покриття (підвищенням гідрофобності поверхонь, введенням ефективних інгібіторів корозії, старіння і біоцидів в полімерні матеріали та покриття на стадії виробництва деталей і вузлів і зборок, використанням біостійких полімерів);
- комбінованими методами (поєднанням згаданих вище напрямків).

Найбільш перспективні такі методи захисту:

- хімічні (розробка ефективних засобів, що містять речовини з поліфункціональними властивостями інгібіторів корозії, старіння і біопшкоджень, екологічно правильних);

- фізичні, радіаційні (з використанням, наприклад,  $^{88}\text{Tc}$  або  $\gamma$ -опроміненням готових виробів). Цей метод ефективний для мікросхем апаратури ЕОМ;
- біохімічні та екологічні (застосування груп і видів мікроорганізмів з антагоністичними ознаками щодо руйнівників, виходячи з їх фізіологічних особливостей або біохімічних властивостей);
- динамічне і статичне осушення повітря;
- застосування речовин біогенного походження і фітонцидів;
- пригнічення розвитку мікроорганізмів зрушенням реакції накопичення продуктів обміну в протилежну сторону.

Комбіновані методи дозволяють досягти ефекту синергізму застосовуваних рецептур при інгібуванні процесів корозії, старіння і біопошкоджень [29].

Найкращі результати можна очікувати від поєднання комплексів впливу на матеріал, середовище і безпосередньо на мікроорганізми. Однак їх застосування вимагає попереднього вивчення конструктивних особливостей систем, умов їх експлуатації, виявлення видового складу мікроорганізмів і визначення їх властивостей і активності щодо матеріалів конструкцій. Для проведення таких досліджень потрібен системний підхід, який описаний нижче.

Підтримка відповідних умов експлуатації, що запобігають поява забруднень і розвиток колоній мікроорганізмів, – один з найважливіших заходів захисту техніки від біокорозії. Відповідні вимоги повинні бути закладені в експлуатаційно–технічну документацію [2, 29].

Впровадження заходів щодо підвищення корозійної і біологічної стійкості матеріалів, покриттів і захищеності металоконструкцій від корозії, старіння і біопошкоджень в цілому дозволяє збільшити довговічність техніки і споруд, що відповідає основним завданням часу.

На основі загальної теорії систем розроблено системний підхід до вирішення проблем захисту конструкцій машин від факторів середовища. Його доцільно використовувати при вдосконаленні методів захисту від розглянутих пошкоджень. Всі перераховані роботи виконують за єдиною системою – від аналізу факторів до розробки нових методів захисту від пошкоджень. При цьому здійснюють [20]:

- вибір показників пошкоджуваності конструкції техніки – ефектів пошкодження (ЕП) з урахуванням конструктивно–технологічних і експлуатаційних особливостей машин, устаткування і споруд;
- аналіз чинників ХГ, що впливають на розвиток процесу ушкоджень, виявлення значущих для обліку в фізичних і математичних моделях (ФМ і ММ),
- накопичення, систематизацію, узагальнення та аналіз інформації про фактичні ефекти ушкоджень при експлуатації техніки;
- проведення експерименту (лабораторних, натурних, експлуатаційних досліджень) з метою визначення ММ і обґрунтування допустимих.

## РОЗДІЛ 6. ВИБІР МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ

### 6.1. Використання металів при конструюванні

#### 6.1.1. Маркування сплавів

Сталі є основною продукцією сталеплавильного металургійного виробництва і основним конструкційним матеріалом машинобудування та інших галузей народного господарства [32].

Для поділу і раціонального застосування всієї різноманітності сталей, що виробляє металургійна промисловість, використовують їх класифікацію та маркування.

Маркування легованих сталей здійснено за спеціальною букво-цифровою системою, згідно з якою легуючі елементи позначені буквами: Н — нікель; Х — хром; К — кобальт; М — молібден; Г — марганець; Д — мідь; Р — бор; Б — ніобій; Ц — цирконій; С — кремній; П — фосфор; Ч — рідкісноземельні метали; В — вольфрам; Т — титан; А — азот (але не в кінці марки); Ф — ванадій; Ю — алюміній [29].

Буква А в кінці марки вказує на більш високу якість сталі та на знижений вміст в ній фосфору. Наприклад, сталь марки 18Х2Н4ВА. В сталі цієї марки міститься 0,18% вуглецю, 2% хрому, 4% нікелю, близько 1% вольфраму. Цифра 18 означає вміст у сталі вуглецю в сотих частках відсотка. Цифра за буквенним позначенням елемента вказує на його вміст у сталі. Якщо вміст у сталі легуючого елемента становить близько 1%, то цифри за позначенням цього елемента не ставлять.

Призначення і властивості легуючих компонентів [34].

**Хром.** Міститься у кількості від 1,5 до 30%. Підвищує твердість і міцність, незначно знижує ударну в'язкість і пластичність. Це досягається за рахунок одночасного подрібнення зерна і підвищення щільності прилягання структурних зерен, усереднення розподілу неметалевих

домішок в кристалічній структурі. При високому вмісті хрому сталь стає корозійностійкою (нержавіючою), за рахунок підвищення щільності упаковки атомів заліза на поверхні матеріалу і зменшення кількості і величини мікродфектів, які концентрують напругу кристалічної структури [34].

**Нікель.** Як і хром, підвищує твердість і жорсткість сталі. Подрібнює структурне зерно, незначно ущільнює кристалічну структуру, але зменшує кількість мікропорожнин і дефектів металу, так як є хорошим розкислювачем. При цьому дещо збільшується щільність сталей. При вмісті більше 1% має антикорозійну дію. Найбільш корозійностійкі сталі містять одночасно нікель і хром. Слід зазначити, що і нікель і хром підвищують мінімальну температуру гартування сталі, при цьому підвищуючи ефективність гартування.

**Вольфрам.** Одна з найцінніших і важливих добавок до сталі. Вольфрам сприяє підвищенню твердості, при цьому підвищується здатність матеріалу зберігати твердість при високих температурах. Це має величезне значення для ріжучого інструменту, що працює при великих швидкостях різання. При гартуванні таких сталей потрібно порівняно повільне і рівномірне охолодження інакше сталь «поведе» і виріб потріскається[34].

**Ванадій.** Підвищує щільність структури і дає додаткову тривимірну зшивання кристалічної ґратки. За рахунок цього досягається підвищення твердості і жорсткості, але, хоча зносостійкість і втомна міцність залишаються на високому рівні, дещо знижується ударна в'язкість.

**Кремній.** Вводиться спеціально в кількості більше 1%, для збільшення енергії зв'язків в кристалічній ґратці. При цьому значно підвищується міцність при хорошій в'язкості. При цьому підвищується тривимірна жорсткість структури, що призводить до високої пружності

загартованої сталі і підвищується корозійна стійкість при високих температурах. При великому вмісті кремнію відбувається накопичення в структурі сталі псевдосолевих структур, що призводить до підвищення електричного опору. При вмісті кремнію 20–40% спостерігається підвищення магнітопроводності матеріалу, що використовується в електротехнічних сталях [33, 34].

**Марганець.** Сприяє підвищенню розчинності вуглецю в залозі з утворенням цементиту. При цьому, більш рівномірно розподіляються неметалеві домішки, що зменшує товщини між зернових прошарків. У результаті, вміст марганцю в межах 1–3% призводить до зростання твердості і жорсткості сталі, майже без втрати пластичності (пружність збільшується пропорційно твердості). Вміст марганцю значно більше 3% призводить до істотного зростання жорсткості сталі, при цьому пропорційно збільшується крихкість. Цього можна уникнути при високому ступені очищення сталі від сірки, кисню і гарячої обробки тиском.

**Кобальт.** За рахунок утворення координаційних зв'язків навколо атомів кобальту, відбувається ущільнення структури металу і додаткове зшивання ґратки. Це призводить до підвищення жароміцності і збільшення опору ударним навантаженням. Також покращує намагнічуваність сталі [35].

**Молібден.** Як і хром, підвищує міцність і протикорозійні властивості, жаростійкість і межу міцності при розтягненні. Через нижчу хімічну активність, ніж залізо, при значній величині координаційних зв'язків, підвищує опір окисненню при високих температурах.

**Титан.** Поєднання високої хімічної активності, низької щільності електронних орбіталей і валентності, більшої, ніж у заліза, титан має цінні легуючі властивості. Він прекрасний розкислювач, стабілізує ближній



порядок кристалічної ґратки, що сприяє міцності структури і подрібнення зерна. Підвищує однорідність сталі і опір корозії.

**Ніобій.** Легуючий аналог ванадію, підвищує рівномірність структури і подрібнює зерно вже при вмісті 0,5–2%. Застосовується для нормалізації структури і зниження внутрішніх напружень в відповідальних деталях великих конструкцій. Застосовується в основному при низькому вмісті в сталі [35].

**Алюміній.** Крім розкислюючих властивостей, має здатність знижувати корозію сталі при високих температурах, за механізмом аналогічно протекторному захисту. При цьому, створює надлишок електронної густини в сталі, що перешкоджає термічній емісії іонів заліза. Також підвищує щільність упаковки хімічних зв'язків в структурі сталі, за рахунок невеликих розмірів і різниці в електронегативності з залізом.

**Мідь.** Збільшує антикорозійні властивості при невеликому вмісті в сталі за рахунок структурної орієнтації кристалічної ґратки. Використовується в кількості до 2%, головним чином, в будівельних сталях.

**Цирконій.** Маючи більш високу активність, ніж залізо і маючи великі розміри атома, рівномірно розподіляється в структурі, орієнтуючи найближчі атоми в тривимірну ґратку. За рахунок цього можна домогтися різної зернистості сталі, в залежності від вмісту цирконію [35].

**Азот.** Утворює в сталі тверді нітриди заліза, які розчиняються в приграничних шарах структурних зерен, покриваючи зерно твердим шаром. Значний вміст азоту викликає сильне підвищення крихкості сталі. Тому азот рідко спеціально вводиться в сталь. Широко використовується для насичення поверхневого шару сталі (0,0001–0,1 мм) при азотуванні, що збільшує твердість поверхні. Застосовується для ріжучого інструменту, підшипників і броньових сталей.

**Фосфор.** Рідко допускається вміст фосфору в межах (0,05–0,2%), так як, він сильно підвищує крихкість сталі і знижує втомну міцність за рахунок підвищення товщини міжзернових прошарків і зниження їх міцності. Підвищує рихлість структури сталі і внутрішні порожнини. При цьому, покращує плинність розплавленої сталі (ливарні властивості і обробку в конвертерах), і зменшує довжину стружки при високошвидкісній обробці різанням, що важливо при автоматичній обробці на швидкодіючих верстатах з програмним управлінням. Це, так звані, автоматні сталі: А20, А40Г, А30, А12 і ін. Вони йдуть на виготовлення маловідповідальних деталей на високопродуктивних металорізальних верстатах з автоматичною подачею заготовок.

У машинобудуванні в основному використовують конструкційні сталі і якісні вуглецеві сталі із вмістом марганцю до 1%. Корозійна стійкість вуглецевих сталей залежить в основному від наявності домішок сірки, що викликає міжкристалічну корозію за рахунок утворення із залізом і марганцем сульфідів, які концентруються по межах зерен. Для збільшення корозійної стійкості сталей їх легують металами із більшим значенням потенціалу або схильними до пасивації. Основним легуючим компонентом є хром. Наступним по значимості є нікель. Підвищує корозійну стійкість, збільшує механічну міцність, пластичність та здатність до зварювання. Такі сталі піддаються, в основному, щілинній корозії. Особливо при наявності в середовищі активаторів – хлорид–іонів.

## **6.2.Леговані сталі та сплави, сфери їх застосування**

### **6.2.1.Сталі мартенситно–феритного і мартенситного класу**

1. Високоміцні корозійностійкі сталі із вмістом хрому – 13%. 08X13, 12X13, 20X13. Вони використовуються для виготовлення деталей, що піддаються дії слабо агресивних середовищ, до яких відносять атмосферні

умови (крім морських), водні розчини солей органічних кислот при кімнатній температурі, розчини азотної кислоти низьких концентрацій. Такі сталі мають високий запас пластичності і піддаються різним видам зварювання. Добре деформуються в холодному і гарячому стані [35].

2. 30X13, 40X13. Використовують для виготовлення важко навантажених деталей пар тертя торцевих ущільнювачів хімічних агрегатів і деталей поршневих компресорів, що працюють у водних розчинах солей, азотної та деяких органічних кислот при температурах до 30 °С. Їх використовують також для виготовлення ріжучого інструменту, вимірювального інструменту, пружин і підшипників. Такі сталі обмежено піддаються холодній деформації.

3. 20X17H2Б, 14X17H2, 95X18. Такі сталі використовують для виготовлення важко навантажених деталей, таких як ножі, фільтри і вали шнекових машин, а також підшипників і валів мішалок в хімічних апаратах, які піддаються сильному зношуванню і дії помірно агресивних середовищ, азотної і органічних кислот при різних концентраціях і температурах. Особливістю цих сталей є те, що вони не піддаються зварюванню.

4. 09X15H8, 07X16H6, 08X17H5. Використовують для виготовлення важко навантажених деталей які працюють в середовищах азотної, фосфорної і оцтової кислот і в атмосфері сірчаноокислих середовищ і сірчаної кислоти. Такі сталі добре зварюються і деформуються в гарячому стані [34, 35].

### **6.2.2.Сталі аустенітного класу**

1. 10X14Г14Н4Т використовується для виготовлення деталей обладнання, що працює в середовищах малої агресивності – органічні кислоти низьких концентрацій при кімнатній температурі [34, 35].

2. 12X18H10T, 12X18H9T, 08X18H10T. Використовуються для зварних конструкцій, які працюють в середовищах середньої агресивності – продукти згорання палива, розбавлені розчини азотної, фосфорної та орг. кислот, розчини лугів і солей. Для підвищення зносостійкості таких сталей використовують азотування і поверхнєве наклепування. Такі сталі добре зварюються всіма видами ручного і автоматичного зварювання і легко піддаються гарячій і холодній деформації.

3.10X17H13M2T використовується для виготовлення зварних конструкцій, що працюють в умовах киплячої фосфорної, мурашиної і оцтової кислот і інших середовищах підвищеної агресивності [34, 35].

### **6.2.3. Аустенітно–феритні сталі**

1.08X22H6T використовується для виготовлення зварної хімічної апаратури, а також каталізаторів полімеризації у виробництві синтетичних канчуків, кормових дріжджів та вакцин. А також для апаратури, що працює у 65% азотній кислоті. При випарюванні і нейтралізації аміачної селітри.

2.08X18Г8H2T – для виготовлення хімічної апаратури, яка працює в окислювальних середовищах – 60%-ва азотна кислота при температурах до 80 °С, 25% фосфорній, в оцтовій і щавлевій кислотах при температурах до 300 °С.

3.12X21H5T – для виготовлення деталей вакуум–випарних апаратів і сушильно–розпилювальних установок, які працюють в середовищах, що не викликають міжкристалітної корозії.

4.10X32H8 – для важко навантажених деталей, що піддаються сильному зношуванню в середовищах помірної агресивності. Цю сталь використовують в якості зносостійких наплавов [34, 35].

#### **6.2.4. Сплави на залізо–нікелевій основі**

06Н28МДТ – для виготовлення деталей зварної апаратури, що працюють в середовищах, що містять іони хлору, а також в сірчаній і оцтовій кислотах при температурі до 80 °С. Сплав піддається зварюванню аргоно–дуговому зваркою [34, 35].

#### **6.2.5. Сплави на нікелевій основі**

1.ХН70МФ – для виготовлення деталей, які працюють при високих температурах у сірчаній кислоті, фосфорній та соляній всіх концентрацій і при всіх температурах, включаючи температуру кипіння.

2.ХН65МВ – для виготовлення зварних конструкцій, які працюють при підвищених температурах в сірчаноокислих середовищах, концентрований оцтовій кислоті, сухому хлорі, хлоридах заліза і інших високо агресивних середовищах [34, 35].

3.ХН60МБ – для виготовлення деталей, які працюють в розчинах кремній–фтористої кислоти при 80 °С, азотній і фосфорній кислотах.

Наступним за поширеністю після сталей конструкційним матеріалом є алюміній і його сплави. Алюміній має здатність до самопасивації в окислювальних середовищах і стійкий у водних середовищах і вологих газах при рН 4...9. А також в концентрованих сірчаній і азотній кислотах і в органічних кислотах. Але легко руйнується в неокислювальних кислотах. Для збільшення стійкості до пасивації алюміній легують титаном (3...5 %).

Після алюмінію за поширеністю матеріалів стоїть мідь. Мідь має слабку схильність до пасивації і тому не стійка в окислювальних середовищах. Тому використовують в основному сплави міді. Бронзи, латуні, сплави з нікелем. До корозійно стійких матеріалів належить також

титан. Який є стійким в сильно окислювальних середовищах в тому його використовують для виготовлення хімічних апаратів [34, 35]..

### **6.3.Сумісність матеріалів у конструкціях**

При плануванні методів захисту необхідно провести аналіз взаємного впливу різнорідних матеріалів конструкції. Ці взаємні впливи можуть бути обумовлені [34, 35]:

1. Безпосереднім контактом двох матеріалів із різними електрохімічними потенціалами.
2. Зміна полярності.
3. Електролітичне перенесення шкідливих іонів із однієї конструкції в іншу.
4. Перенесення металічних частинок з потоком рідини.
5. Шкідливий вплив блукаючих струмів, а також інші ефекти, що виникають внаслідок близького розміщення різнорідних матеріалів.

У складних установках і системах конструкційні елементи із різних матеріалів і сплавів часто працюють в електропровідних середовищах. В більшості випадків не вдається уникнути контакту між різнорідними матеріалами.

Для раціональної роботи конструкції із різнорідних матеріалів необхідно виконати ряд вимог:

1. Вибір сумісних матеріалів.
2. Проектування і впровадження діелектричного розділення.
3. Регулювання складу корозійного середовища для зменшення агресивності.

Сумісними вважають такі матеріали, поєднання яких при конкретних розмірах і середовищі не призводить до руйнування конструкції впродовж економічно обґрунтованого терміну експлуатації.

При виборі сумісних пар необхідно враховувати, що контактна корозія може виникати не тільки в наслідок різних електродних потенціалів різнорідних матеріалів, але і різного складу одного матеріалу.

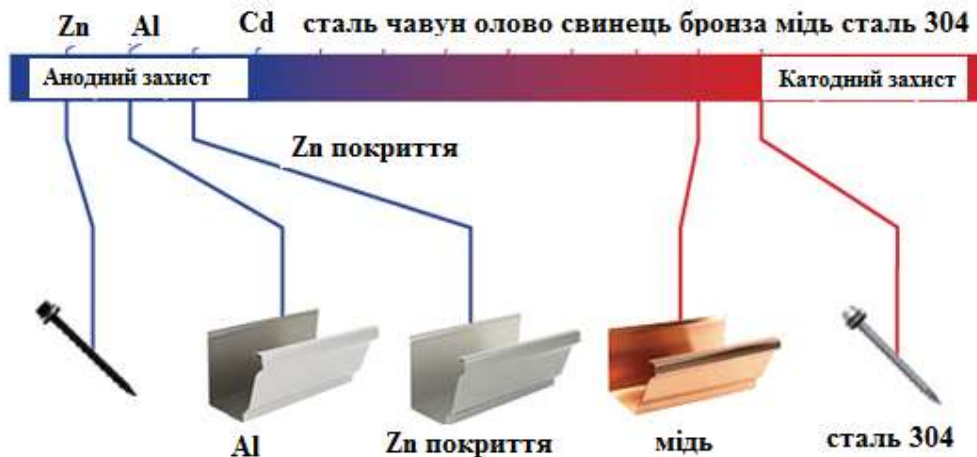


Рис. 6.1. Гальванічна шкала, що показує розташування потенціалів основних металів по відношенню один до одного

При вирішенні питання про можливість сумісного використання різнорідних матеріалів необхідно задовольнити дві вимоги [34, 35].:

1. Функціональні вимоги до конструкції.
2. Вимоги до стійкості матеріалу в певному корозійному середовищі.

Компроміс між цими двома вимогами досягається за рахунок вибору матеріалів за наступними показниками:

1. Поєднання металічних і неметалічних деталей.
2. Врахування різниці електрохімічних потенціалів.
3. Врахування особливості корозійного середовища.
4. Відносні розміри катода і анода в гальванопарі.
5. Врахування електропровідності середовища.
6. Можливі градієнти температури.
7. Пошарова неоднорідність матеріалу.
8. Швидкість і напрямок руху електропозитивних іонів.
9. Наявність блукаючих струмів.

## 10.Можливість виникнення корозійно агресивних золів.



Рис. 6.2. Приклад корозії між двома типами сталей, що мають різний електрохімічний потенціал

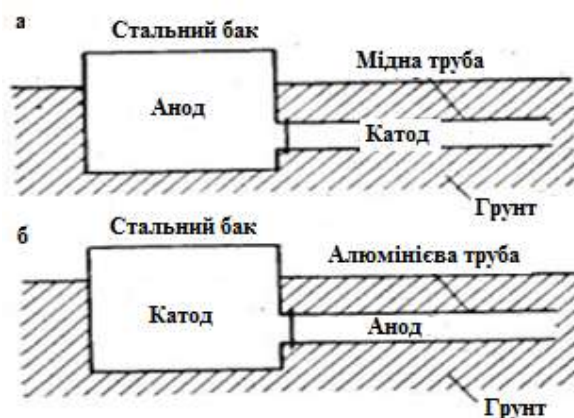


Рис. 6.3. Приклад розповсюджених контактних пар різних металів, де стальний бак може виступати у ролі аноду *а*, і катоду *б*

Схематично процеси, які перебігають при корозії гальванопари можна зобразити у вигляді рисунка 6.4. З нього видно, що по відношенню до заліза цинк має більш негативний потенціал, тому виступає у ролі анода і розчиняється. А мідь навпаки, у ролі катода, при цьому розчиняється залізо [34, 35].



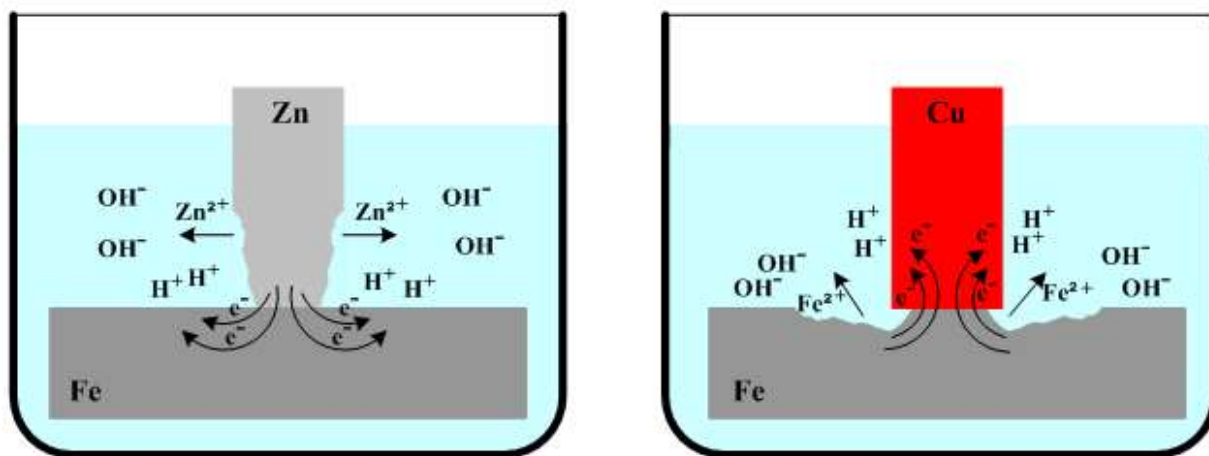


Рис. 6.4. Процеси, що перебігають під час корозії

### 6.3.1. Загальні рекомендації з поєднання різнорідних матеріалів

Різнорідні матеріали, які знаходяться в тісному контакті або з'єднані електропровідними шляхами необхідно використовувати тільки в тому випадку, коли це продиктовано функціональними вимогами до конструкції або іншими важливими факторами. При використанні різнорідних матеріалів рекомендується вибирати потрібні пари за довідником контактної корозії [32, 33].

Для правильного вибору сумісних матеріалів необхідно мати точну і вичерпну інформацію про склад використовуваних матеріалів, і, особливо про наявність домішок. Необхідно враховувати, що вплив контактної корозії можна знизити шляхом зменшення електропровідності середовища (щоб не було плівки води). Якщо в конструкції неможливо запобігти поєднанню несумісних матеріалів то необхідно обов'язково їх розділити діелектриком або максимально подовжити шлях електролітичного перенесення між ними (Рис. 6.5). Розділення діелектриком можна забезпечити декількома методами [32, 33]:

1. Ізолюючі прокладки для фасонних з'єднань.

2. Бутил–каучукова стрічка для протяжних поверхонь.
3. Намазний герметик для складних спряжень та з'єднань, які мають малі розміри.

Електрична ізоляція повинна мати достатню товщину і повне заповнення поверхні. Якщо в конструкції використовуються магнієві сплави, то вони повинні бути відділені від інших елементів неабсорбуючою вініловою або гумовою стрічкою або герметизуючою складом. Такі ущільнення повинні виступати як мінімум на 3 міліметри за краї з'єднань і мати товщину не менше 75 мкм. Коли розділення діелектриком двох різнорідних металів неможливе, то необхідно між ними помістити третій метал, який буде зменшувати різницю потенціалів між двома з'єднуваними матеріалами. При конструюванні із різнорідних матеріалів слід уникати утворення зазорів між ними. Так як корозія таких з'єднань перебігає значно активніше ніж сама по собі контактна корозія.



Рис. 6.5. Приклад застосування діелектрика у якості розділяючого елементу конструкції(знизу); корозія труби при відсутності такого діелектричного з'єднання (зверху).

Таблиця 6.1. Сумісність різних матеріалів між собою

Метали	Сталь	Алюміній	Дюраль	Медь	Латунь	Бронза	Хром	Нікель	Цинк	Олово	Припой ПОС
Сталь	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+
Алюміній	+	+	+	-	-	-	+	-	+	П	П
Дюраль	+	+	+	-	-	-	+	-	+	П	П
Медь	-	-	-	+	+	+	+	+	-	П	П
Латунь	-	-	-	+	+	+	+	+	-	П	П
Бронза	-	-	-	+	+	+	+	+	-	П	П
Хром	+	+	+	+	+	+	+	+	+	П	П
Нікель	+	-	-	+	+	+	+	+	+	П	П
Цинк	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+
Олово	+	П	П	П	П	П	П	П	+	+	+
Припой ПОС	+	П	П	П	П	П	П	П	+	+	+

З табл.6.1 видно, що алюміній може контактувати з цинком і хромом (знак +), а ось контакт з нікелем йому протипоказаний (знак -). Літера «П» означає, що олово чи його сплави необхідно спаювати з відповідними металами [32, 33].

У морських і інших електропровідних атмосферах, в яких утворюються електропровідні плівки вологи, руйнівна дія контактної пари проявляється у зоні 5 см навколо контакту. В цій зоні рекомендується використовувати діелектричні розділювачі або відповідний припуск у товщині. Важливим фактором для зменшення швидкості руйнування є чистота поверхні з'єднання. Особливо слід уникати утворення іржі поблизу поверхні контакту двох металів. Так як іржа є гігроскопічним матеріалом і може поглинати до 50% вологи від своєї маси, що призводить до прискорення контактної корозії [36].

Необхідно уникати поєднання великих катодних і малих анодних поверхонь, а також пробілів в ізоляції, коли ізолюється анодна поверхня. Для зварювання і паяння необхідно використовувати припой і зварювальні

матеріали, які є катодними по відношенню хоча б до одного з металів гальванопари. Використовувані для з'єднання різнорідних матеріалів клеї повинні мати низьку електропровідність [32, 33].

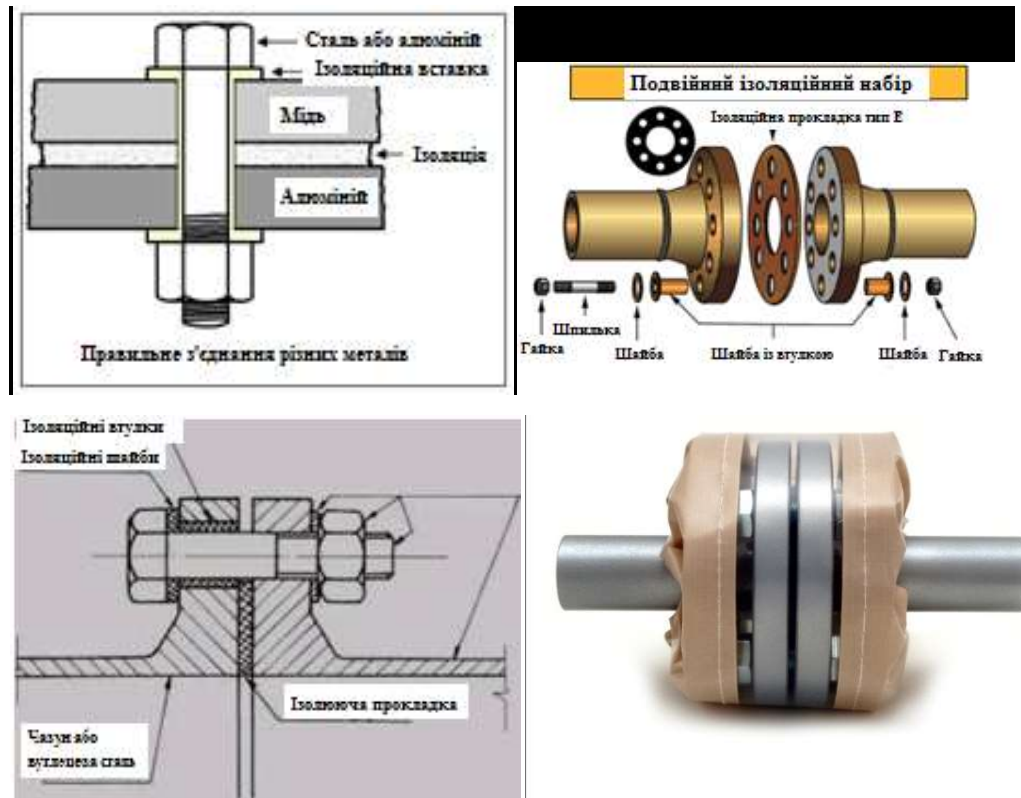


Рис. 6.6. Приклад правильного встановлення ізолюючих прокладок для запобігання корозії

## РОЗДІЛ 7. ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПРОЦЕС КОРОЗІЇ

Руйнуванням можна вважати явище розділення конструкції на частини внаслідок порушення міцності. Міцність матеріалу розглядають при статичних, динамічних, теплових навантаженнях, відповідно руйнування відбувається при дії статичних, теплових, динамічних збуджень в різних умовах експлуатації (температура, вологість, агресивні середовища) [32, 33].

Основні види руйнування [32, 33]:

1. Пластичне руйнування. Відбувається при значній пластичній деформації, яка виникає по всьому (або майже по всьому) об'єму тіла.

2. Ідеальне крихке (пружне) руйнування відбувається без пластичної деформації, причому з двох одержаних частин зразка можна наново скласти тіло початкових розмірів. Квазікрихке руйнування припускає наявність пластичної зони перед краєм тріщини і зміцнення матеріалу на поверхні тріщини (інший, і значно більший по величині, об'єм тіла знаходиться при цьому в пружному стані). В техніці квазікрихким називають руйнування, при якому руйнуюча напруга вище за межу текучості, але нижче межі міцності.

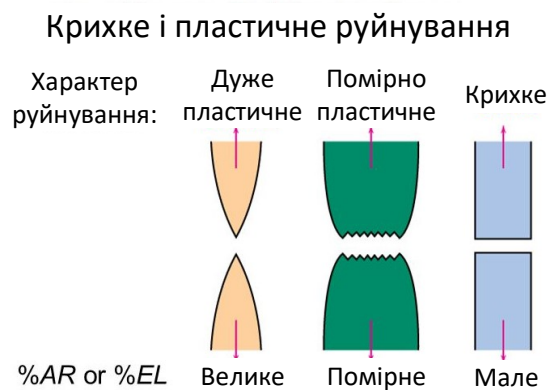


Рис. 7.1. Схема порівняння пластичного і крихкого руйнування

3. Втомне руйнування – відбувається при циклічному (повторному) навантаженні в результаті накопичення необоротних пошкоджень. Злам макроскопічно крихкий, однак, поверхні зламу матеріал істотно наклепує. Розрізняють втомленість і малоциклову втомленість.

Втомленість характеризується номінальними напруженнями, меншими за границю текучості, повторне навантаження макроскопічно відбувається в пружній області, число циклів до руйнування велике.

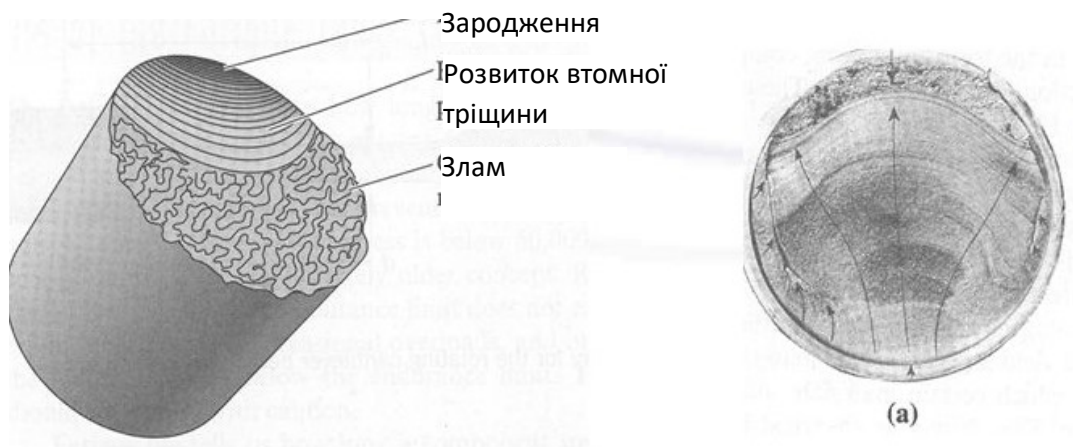


Рис. 7.2. Аналіз зламу поверхні при втомному руйнуванні.

Малоциклова втомленість (інакше повторно–статичне навантаження) характеризується номінальними напруженнями, більшими за границю текучості, при кожному циклі навантаження виникає макроскопічна пластична деформація, число циклів до руйнування порівняно невелике.

4. Руйнування при повзучості характерне для в'язкопружних матеріалів, зокрема полімерів і металів при високих температурах.

5. Корозійне руйнування. Має місце при дії хімічно агресивних середовищ [32, 33, 37].

Розрізняють два види механічних напруг – внутрішні і зовнішні. Внутрішні напруження виникають при термічній і механічній обробці деталей, при зварюванні. Зовнішні, докладені ззовні напруги, можуть бути статичними і змінними.

Під впливом механічних напружень змінюється структура поверхневого шару металу, що може викликати зміну потенціала на його окремих ділянках, руйнування захисних плівок, і як наслідок цього – зміна швидкості корозії.

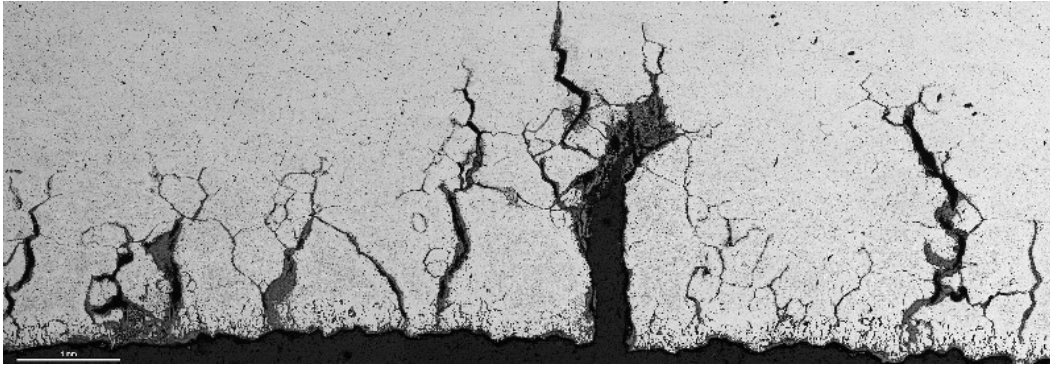
Корозійні процеси при механічних навантаженнях протікають через три послідовні стадії: інкубаційний період, який відповідає відсутності видимих руйнувань; період утворення осередків корозії; період швидкого масштабного руйнування.

Наявність механічних напруг в металі, що лежать в пружній області або пов'язаних з деформацією, призводить до порушення суцільності захисних плівок. Зазвичай розтягуючі або стискаючі напруги мало впливають на швидкість рівномірної корозії. Якщо під дією корозійного середовища відбувається локалізація механічного фактора, то це призводить до швидкого руйнування конструкції [37].

### **7.1. Корозія під напруженням (або корозійне розтріскування)**

Корозія під напругою (або корозійне розтріскування) – це корозія при одночасній дії корозійного середовища і постійних чи тимчасових напруг. Цей процес можна уявити наступним чином: спочатку на поверхні виробу виникає місцева корозія у вигляді виразок, які починають діяти в якості концентраторів напруг. Максимальне значення напруги буде на дні виразки, яке має більш від'ємний потенціал, ніж стінки, в результаті чого руйнування металу буде йти в глибину, а виразка буде переходити в

тріщину. Цьому виду корозії піддаються вали гребних гвинтів, ресори автомобілів, канати, охолоджуючі валки прокатних станів та ін.



*Рис. 7.3.* Поверхня металу, що піддалася корозійному розтріскуванню.

Тріщини можуть зароджуватися і рости при низьких напруженнях. При цьому їх утворення відбувається під дією навколишнього середовища. Так, занурення металу в рідину може привести до утворення в ньому тріщин навіть при нульових напруженнях. Агресивне середовище, яке викликає корозію металу, в нормальних умовах не приводить до його руйнування, проте, при дії механічних напружень, воно може привести до утворення тріщин. Для пояснення корозії під напруженням було висунуто декілька теорій, проте єдиного механізму поки-що не знайдено [33, 37].

В багатьох матеріалах тріщини в процесі корозії під напруженням утворюються всередині кристалічних зерен внаслідок відмінності структури поверхні кристалічного зерна і його об'єму, що викликано корозійною дією середовища. Характерний зовнішній вигляд поверхні, зруйнованої при корозії під напруженням, показано на рис. 7.1 [33, 37].

На рис. 7.2 представлено поверхні руйнування, які утворилися при корозії під напруженням в двох різних середовищах. Поява граней кристалічних зерен є наслідком дії агресивної речовини. При корозії під напруженням в атмосфері поверхні кристалічних зерен і їх межі не



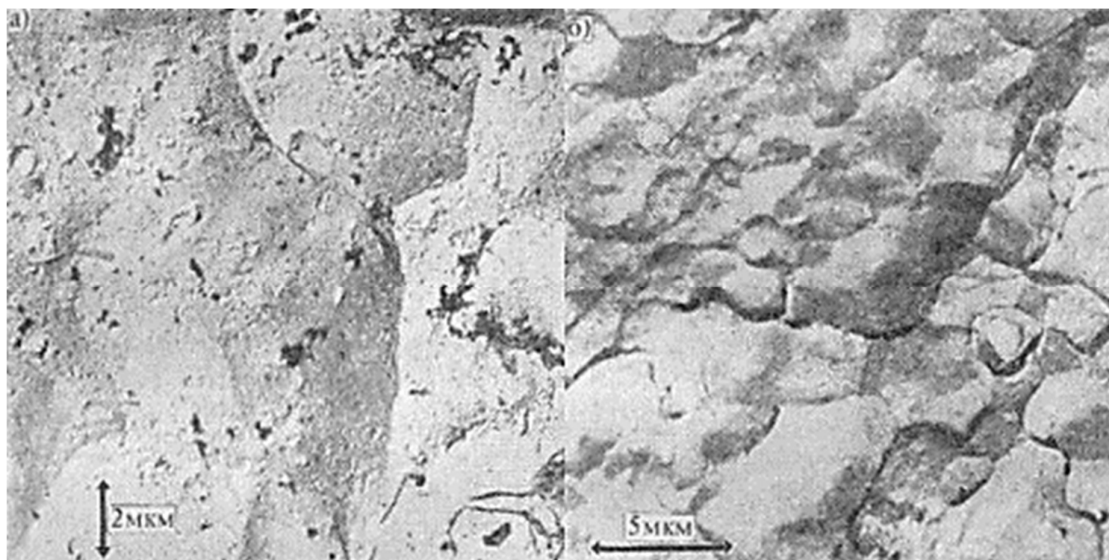
зазнають істотних змін, що ясно видно на рисунку. В солоному розчині грані кристалічного зерна згладилися, розчин глибоко пройшов в шари матеріалу під поверхню кристалічних зерен.

Проте, результати цих спостережень не можна узагальнювати. Зовнішній вигляд граней кристалічного зерна на одній і тій же поверхні руйнування має помітні відмінності. В деяких випадках причиною корозійного розтріскування може бути водень, що виділяється під час корозії. Наявність водню в сталях може викликати утворення тріщин навіть під час їх обробки [33, 37].

Водень може також викликати утворення тріщин у високоміцних сталях після певного періоду тривалого навантаження (статична втоменість). Під дією водню руйнування може відбутися і тоді, коли матеріал містить лише невелику кількість цього газу, і ніякого погіршення властивостей матеріалу в дослідах на короткочасне розтягування не спостерігається. Невеликий за розміром атом водню проникає дуже швидко вглиб ґратки металу; водень концентрується в областях з великими тривісними напруженням, тобто в областях перед тріщиною. Руйнування під дією водню носить внутрішньокристалічний характер, подібно корозії під напруженням в сталях.



*Рис. 7.4.* Поверхня внутрішньокристалічного руйнування, отримана при корозії під напруженням в алюмінієвому сплаві 7079



*Рис. 7.5.* Корозія під напруженням алюмінієвого сплаву 7075 в солоній воді (а) і у вологій атмосфері (б)

До корозійного розтріскування схильні випарні апарати, трубопроводи, автоклави та інші апарати (рис. 7.6).



*Рис. 7.6.* Обладнання хімічної промисловості, що може піддаватись корозійному розтріскуванню.

## 7.2.Водневе руйнування

Водневе руйнування – зменшення властивості нести навантаження внаслідок проникання водню в метал [33, 37].

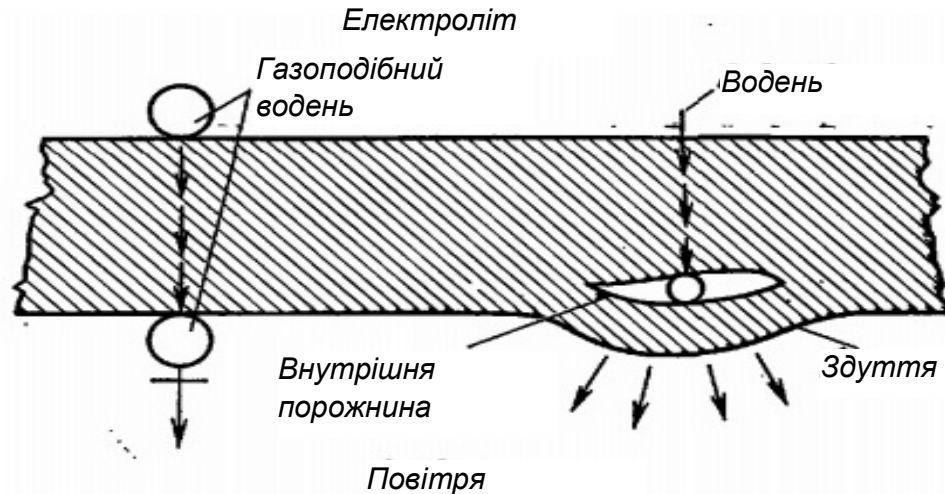


Рис. 7.7.Схема водневого руйнування металу.

Механічне пошкодження металу, обумовлене присутністю водню або взаємодією з ним. Водневе здуття і воднева крихкість викликається впровадженням атомарного водню в метал. При високих температурах водень викликає видалення вуглецю. Поява водню пов'язана з технологічними операціями знежирення, травлення, катодного захисту, зварювання, корозії.

Заходи щодо захисту [33, 37]:

- Використовувати метал з чистою поверхнею.
- Використовувати стійкий (монометалічний або плакований) матеріал.
- Використовувати зварювальні електроди з низьким вмістом водню в обмазці та забезпечувати проведення зварювання в сухих умовах.
- Забезпечувати правильну підготовку поверхні та її оброблення.
- Виключати помилки при виконанні операцій травлення і нанесення металопокриттів.

- Забезпечувати металізацію воднево–стійким металом або використовувати біметал з відповідним воднево–стійким плакуванням.
- Створювати напруги стискання.
- Видаляти водень з металу гарячою сушкою (93–149°C).
- Забезпечувати контроль за хімічним складом середовища (використання інгібіторів, усунення сульфідів, сполук арсену, ціанідів і фосфоровмісних іонів).
- Контролювати потенціал катодного захисту.
- Передбачувати нанесення непористих захисних покриттів (гума, пластик).

### 7.3.Корозійна втомлюваність

Корозійна втомлюваність – руйнування металу, викликане прикладання змінних навантажень за наявності корозійного середовища, звичайно протікає у формі розтріскувань [33, 37].



Рис. 7.8. Схема корозійно–втомного руйнування металу.

Корозійна втомлюваність значною мірою подібна тому, як при поєднанні статичних напружень з корозією виникає корозійне розтріскування. При поєднанні циклічних навантажень з корозією виникає корозійна втома. Вона виражається в руйнуванні металу, що виникає при істотно більш низькій межі втоми, ніж неагресивних умовах. Ефект

руйнування при комбінованому впливі корозії і циклічного навантаження більший, ніж сума відповідних ефектів при окремому впливі корозії і циклічного навантаження.

Заходи щодо захисту [33, 37]:

- Максимально зменшити чи усунути циклічні навантаження.
- Збільшувати розміри, масу або локальну міцність в критичних перетинах.
- Зменшувати концентрацію напружень або перерозподілити їх.
- Надавати обтічну форму галтелям для зменшення концентрації напружень і для розподілу останніх.
- Розподіляти напруження і деформації по всьому конструктивному елементу.
- Вибирати правильну форму критичних перерізів.
- Змінювати форму і розміри деталей з метою перерозподілу невикористовуваного матеріалу в ненавантажених елементах, що знаходяться під критичним навантаженням перетину.
- Забезпечувати достатню еластичність, щоб зменшити збільшення напружень внаслідок термічного розширення, вібрацій, ударів і експлуатації споруд та обладнання.
- Враховувати можливість швидких змін навантаження, температури або тиску.
- Уникати внутрішніх напружень.
- Уникати в конструкціях биття, виникнення або перенесення вібрацій.
- Збільшувати частоту власних коливань проектного об'єкта з метою зменшення резонансної корозійної втоми.
- Прагнути до застосування конструкційних матеріалів з підвищеною пластичністю і ударною в'язкістю.

- Підбирати підходящі матеріали.
- Передбачати ослаблення напруги шляхом термічної обробки, дробильноструменевого наклепу, обкатки, обтиснення, рідинного хонінгування, голтовки та ін. з метою створення напруги стискання.
- Передбачати відповідну обробку поверхні.
- Передбачати під час проектування усунення концентраторів напруг, фретінга, задирання і корозії.
- Передбачати електроосадження цинкових, хромових, нікелевих, мідних покриттів і азотування за технологією, що виключає виникнення напруг, що розтягують.
- Змінювати склад середовища або інгібувати його з метою зниження корозійної активності.
- Аналізувати напруги за допомогою ЕОМ.

#### 7.4.Кавітаційна корозія

Кавітаційна корозія — пошкодження металу, пов'язане із «схлопуванням» порожнин в рідині на поверхні її поділу з твердим тілом.

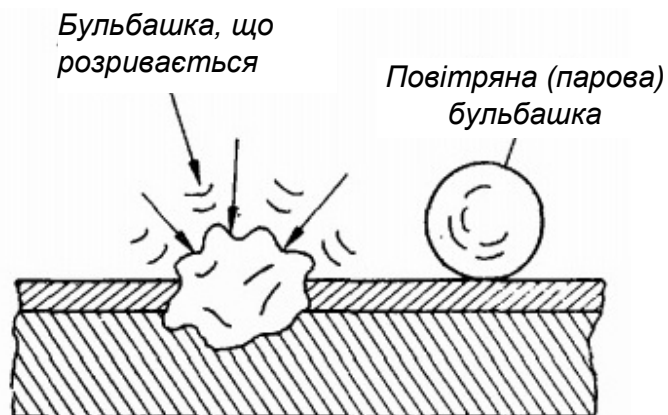


Рис. 7.9. Схема кавітаційного руйнування металу.

Періодичне схлопування парових бульбашок на поверхні деталі призводить до руйнування металу (кавітаційна втома). Зони зниженого

тиску, що утворюються при розширенні потоку, русі рідини, наявності перешкод на шляху потоку або внаслідок вібрації [33, 37].

Заходи щодо захисту:

- Уникати умов, при яких абсолютний тиск падає нижче тиску парів рідини.
- Зводити до мінімуму різниці гідродинамічних тисків.
- Знижувати перенесення вібрації.
- Вибирати відповідні геометричні форми або кути поверхні, на якій відбуваються формування, накопичення і небажаний рух газових бульбашок в рідині.
- Перешкоджати доступу диспергованого повітря (якщо тільки воно не потрібне для формування захисного шару окислів).
- Вибирати стійкі матеріали, що міцнішають в результаті наклепу, в ході руйнуванням бульбашок.
- Наносити еластичні покриття або облицювання.
- Вводити або генерувати в рідини більші повітряні або газові бульбашки, що амортизують процес кавітації.

### **7.5.Фретінг–корозія**

Фретінг–корозія – локальне руйнування на поверхні поділу між двома контактуючими поверхнями, прискорене відносним рухом з амплітудою, достатньою для забезпечення ковзання однієї поверхні відносно іншої.

Ця корозія розвивається при тісному контакті двох поверхонь, що зазвичай перебувають під досить великим навантаженням і піддаються дуже слабкому відносному руху (найменше ковзання, що викликаються вібраціями високої частоти). Відмінності в пружній деформації поверхонь можуть бути достатньою причиною для виникнення в цих умовах фретінг–

корозії, яка, викликається зварюванням контактуючих виступів з подальшим їх руйнуванням. Зношування поверхневих захисних плівок може викликати контактну корозію і корозію, обумовлену роботою концентраційного елемента [37].

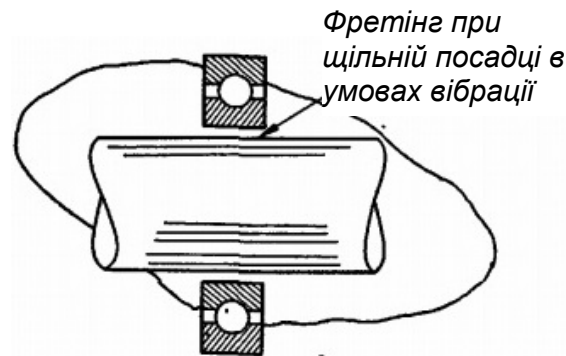


Рис. 7.10. Схема виникнення фретінг-корозії

#### Заходи щодо захисту:

- Усувати конструктивні елементи, що передають вібрацію.
- Вводити бар'єр між металами, що ковзають відносно один одного.
- Збільшувати навантаження стискання (але не перевантажувати!) до припинення взаємного ковзання.
- Передбачати захисні покриття з пористого (утримуючого мастило) матеріалу.
- Ізолювати рухомі деталі від нерухомих.
- Збільшувати абразивну стійкість пов'язаних поверхонь спеціальною обробкою однієї з них або обох.
- Забезпечувати недоступність опорних поверхонь для кисню.
- Покращувати змащування шляхом забезпечення кращих умов надходження мастильних матеріалів.
- Забезпечувати змивання найдрібніших уламків (окису плівок і металу), використовуючи рух мастила.



### **7.6. Загальні рекомендації по зменшенню впливу механічних напружень на корозійні процеси**

Найбільш важливими параметрами, які необхідно враховувати при вивченні впливу механічних напружень є властивості матеріалів, величина і знакозмінність напружень, характер корозійного середовища, температура, прогнозований термін служби об'єкта [32, 33].

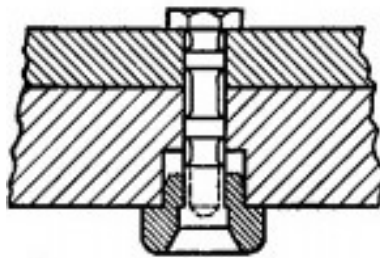
Корозійне розтріскування викликається тільки розтягуючими напруженнями, при чому є автокаталітичним процесом, але небезпека такого руйнування значно зменшується із зростанням пластичності матеріалів, що використовуються. Циклічні навантаження призводять до корозійної втоми при невеликій частоті знакозмінних напружень. Фреттінг–корозія викликається періодичним прискореним рухом або відносним зміщенням поверхонь стискання. При виборі матеріалів для відповідальних вузлів і деталей перевагу необхідно надавати матеріалам, які одночасно стійкі до міжкристалічної корозії і до корозії під напруженням. Зазвичай такими матеріалами є спеціальні сплави, які проходять гомогенізацію.

При використанні різнорідних матеріалів необхідно передбачити операції по підвищенню ударної і пластичної в'язкості, а для збільшення місцевої міцності передбачити операції термообробки, загартування, цементації або азотування. Для зведення до мінімуму можливості міжкристалічної корозії міцні хромо–нікелеві сталі піддають спеціальній термообробці для отримання твердого розчину і перед використанням у конструкції знімають утворені в процесі термообробки напруження з допомогою операції відпуску або обробкою ультразвуком [32, 33].

При виборі технології зварювання перевагу слід надавати тій, яка дає можливість отримання суцільних однорідних швів, при чому електроди виготовляють із матеріалу, який сумісний із зварюваним. Після

зварювання необхідно передбачити очищення поверхні швів від забруднень. Слід уникати ослаблення навантажених деталей в точках максимальних напружень за рахунок надрізів, різких змін поперечного перерізу, гострих кутів, канавок, шпоночних пазів, отворів для мащення.

При складанні конструкції необхідно не допускати задирів, а також передбачити вимивання твердих продуктів зношування рухом мастильного матеріалу. Для зменшення напружень в місці кріплення використовувати прокладки з більш м'якого матеріалу [32, 33].



*Рис. 7.11.Схема болтового з'єднання із використанням прокладок з більш м'якого матеріалу*

Для зменшення корозійного впливу середовища необхідно передбачити можливість видалення корозійно агресивних агентів або введення інгібіторів.

#### Основні рекомендації [32, 33]:

1. Передбачати при проектуванні споруд достатню гнучкість конструкцій, щоб запобігти виникненню надмірних напружень внаслідок термічного розширення, вібрацій і додаткових робочих навантажень.
2. В умовах можливих вібрацій запобігати використанню сполучень на заклепках.
3. Рекомендується проводити аналіз напружень в складних спорудах за допомогою обчислювальної машини.

4. При розподілі навантажень слід мати на увазі анізотропні властивості металу:

а) зрізи поперек волокон матеріалу слід або не залишати незахищеними, або захищати від корозії під дією середовища;

б) не допускати виникнення напружень при загартуванні або підгонці, або знімати їх;

в) вибирати технологію виготовлення, приділяючи особливу увагу можливим наслідкам впливу локалізованих напруг.

5. Частому розтяганню або стисканню елементів конструкції слід віддавати перевагу перед вигинами і скручуваннями.

6. По можливості зменшувати у спорудах коефіцієнти концентрації напруг.

7. Вибирати розміри і стан елементів споруди, щоб діючі на них навантаження були розподіленими. Чим менше елемент, тим краще розподіл напружень.

8. Домагатися збільшення міцності за рахунок поліпшення розподілу напруг при зміні форми відповідальних перетинів.

9. Передбачати заокруглення внутрішніх і зовнішніх кутів.

10. Зрівнювати жорсткість конструйованих елементів. Міцність поліпшується, коли за відповідній жорсткості кожен елемент несе свою частку навантаження.

11. Зводити до мінімуму розширення і стиснення елементів конструкції (в результаті повзучості, нагрівання або впливу напруг).

12. Деформація і наклеп сталей можуть сприяти надлишковому місцевому роз'їданню в місцях дефектів і збільшенню швидкості корозії. Рекомендується зняття напруг.

13. Дефекти (газові раковини, підрізи, неметалеві включення, щілини і тріщини) можуть діяти як ділянки з підвищеними залишковими розтягувальними напругами і знижувати корозійну стійкість споруди.

14. Уникати надрізів. Єдиними конструкційними матеріалами, не чутливими до надрізів, є армовані пластики.

15. Уникати гострих країв (особливо тонких кромek), передбачати зняття фасок, видалення задирок шліфуванням, фрезеруванням або проковуванням. Уникати гострих внутрішніх кутів.

16. Вибирати технологічні методи виготовлення, механічної обробки і зборки, що створюють мінімальні залишкові напруги. По можливості передбачати плавні закруглення.

17. Кращі конструкції, що дозволяють здійснювати точну збірку без додаткових навантажень одних елементів або вузлів іншими.

18. Елементи основної споруди, що проходять крізь її стінки і пов'язані з цією спорудою елементи конструкцій повинні витримувати той же гідростатичний тиск і ті ж деформаційні навантаження, що і основна споруда.

19. Слід посилювати споруди в місцях ослаблення жорсткості наскрізними елементами.

20. Поперечні елементи жорсткості повинні бути по можливості великими і практичними для здійснення.

21. Уникати недостатньою напусків.

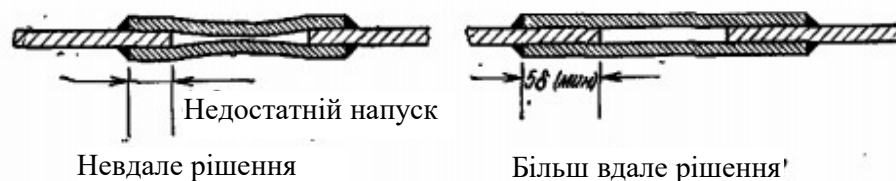


Рис. 7.12. З'єднання з напуском.

22. Уникати швів з неповним проплавленням.

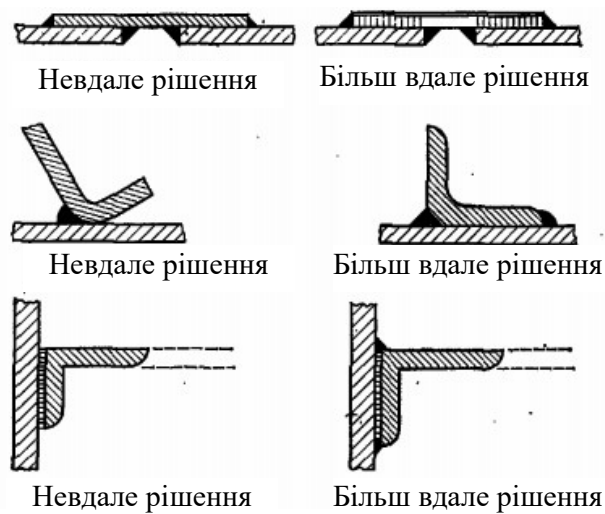


Рис. 7.13. Зварні з'єднання з різним проплавленням.

23. Уникати переривчастих швів.

24. Уникати отворів з різьбою.

25. Передбачати зварні з'єднання для забезпечення якісних швів на всіх доступних обробці ділянках.

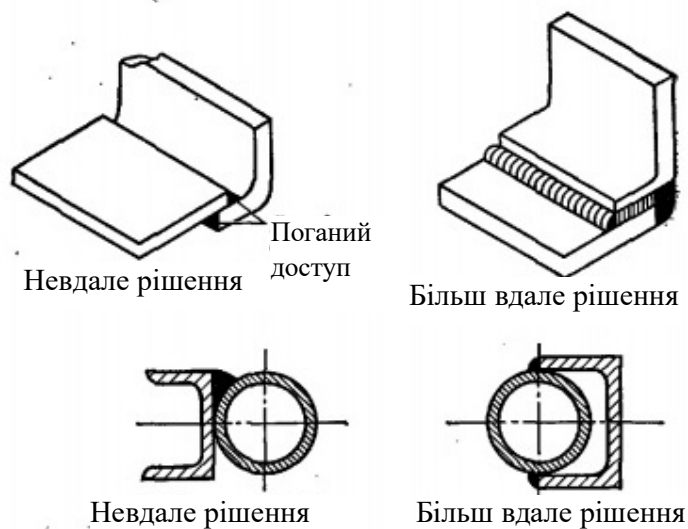


Рис. 7.14. Зварні з'єднання з різною кількістю швів.

### **7.7.Вплив механічних факторів на корозію трубопроводів**

Системи трубопроводів можуть пошкоджуватись в результаті теплового розширення, ударів, вібрації і роботи обладнання. Для зменшення впливу механічних факторів необхідно забезпечити достатню гнучкість трубопроводів. Так як в протилежному випадку виникає відносне зміщення, що призводить до виникнення перенапружень і руйнування в місцях з'єднання труб, а також небажані деформації обладнання. Для уникнення цих явищ необхідно змінювати напрями прокладання трубопроводів з допомогою колін, петель і відводів. А також забезпечувати компенсацію теплового розширення з допомогою компенсаторів, шарових сполучень, гофрованої труби або сильфонів. Кріплення і хомути трубопроводів повинні допускати вільне переміщення для уникнення механічних напружень. Не рекомендується з'єднувати трубопроводи в точках максимальних напружень. Для зменшення теплових напружень і вирівнювання теплового поля слід використовувати теплоізоляцію з відповідного матеріалу і певної товщини. При виборі форми перерізу трубопроводу з точки зору механічної стійкості слід враховувати, що круглі і овальні труби більш міцні і жорсткі ніж труби прямокутного перерізу. При проходженні труб через стіни або перегородки отвір у перегородці повинен бути більшим діаметрі труби на 1–2 см і заізолюваний ущільнюючим матеріалом. При використанні інгібіторного захисту трубопроводів слід передбачити можливість підтримання концентрації інгібітору по довжині [32, 33].

Правильна геометрична форма з'єднань і кріплень теплообмінних трубок з трубними дошками сприяє зниженню концентрації напружень.

## РОЗДІЛ 8. ХАРАКТЕРИСТИКА КОРОЗІЙНИХ СЕРЕДОВИЩ

### 8.1. Атмосфера як корозійне середовище

Процес корозійного руйнування металу в умовах дії факторів оточуючого повітряного середовища прийнято називати атмосферною корозією. Це корозія споруд і обладнання, що експлуатуються в нормальній земній атмосфері. Це також, найбільш поширений вид корозії, що завдає значних збитків народному господарству [38].

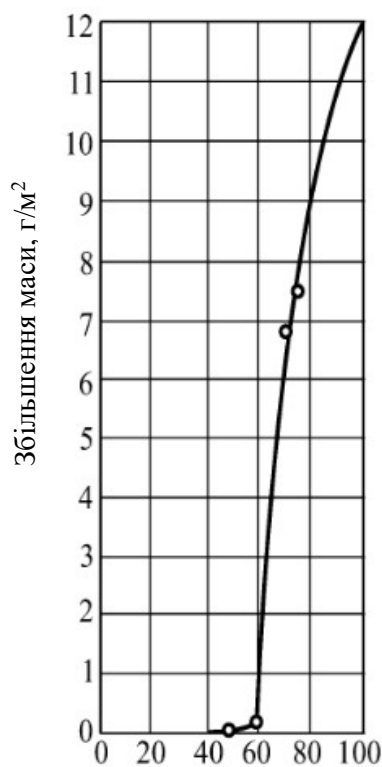
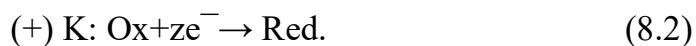
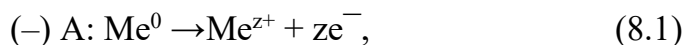


Рис. 8.1. Корозія заліза у повітрі, що містить 0,01% (об.)SO<sub>2</sub>

Атмосферна корозія – перебігає не в об'ємі електроліту, а у тонких шарах. Тонка плівка електроліту зумовлює дуже інтенсивний, по відношенню з об'ємом електроліту, доступ кисню до металічної поверхні і

призводить до того, що катодні процеси атмосферної корозії перебігають, переважно, з кисневою деполяризацією, причому з більшою швидкістю. Навіть такі метали, які у нейтральних електролітах при повному їх зануренні руйнуються в основному з водневою деполяризацією, під плівкою електроліту починають кородувати в значній мірі та з кисневою деполяризацією.

Сутність електрохімічної корозії полягає в анодному розчиненні металу на ділянках з менш позитивним значенням електродного потенціалу і катодному відновленні окисника із навколишнього середовища на ділянках з більшим значенням електродного потенціалу, завдяки чому самі катодні ділянки зберігають свою цілісність. Умовно цей процес записується за допомогою напівреакцій [1]:



Окисниками при електрохімічній корозії найчастіше виступають  $O_2$  і  $Cl_2$  у вологому повітрі, йони  $H^+$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $NO_3^-$  тощо. У загальному випадку середовищем електрохімічної корозії може бути:

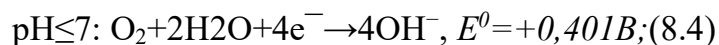
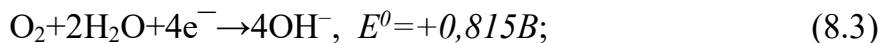
- електроліт (водні розчини кислот, солей, лугів, морська вода);
- вологий газ;
- вологий ґрунт.

Усі окисники, які сприяють перебігу катодної реакції відновлення, називаються **деполяризатор**, а катодний процес – **деполяризація**.

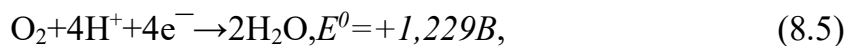
Здебільшого на катодних ділянках спостерігається іонізація (відновлення) кисню [1]:

- у нейтральному чи лужному середовищі:  
при  $pH \approx 7$ :





- у кислому середовищі:



- а також виділення водню:



Корозійний процес, що супроводжується поглинанням і відновленням на катоді газоподібного кисню  $\text{O}_2$ , називається **корозією з кисневою деполяризацією**.

Корозійний процес, при якому на катоді відновлюються йони гідрогену  $\text{H}^+$  і виділяється газоподібний водень  $\text{H}_2$ , називається **корозією з водневою деполяризацією**. Схематично обидва види корозійної деполяризації показані на рис. 8.2 [1].

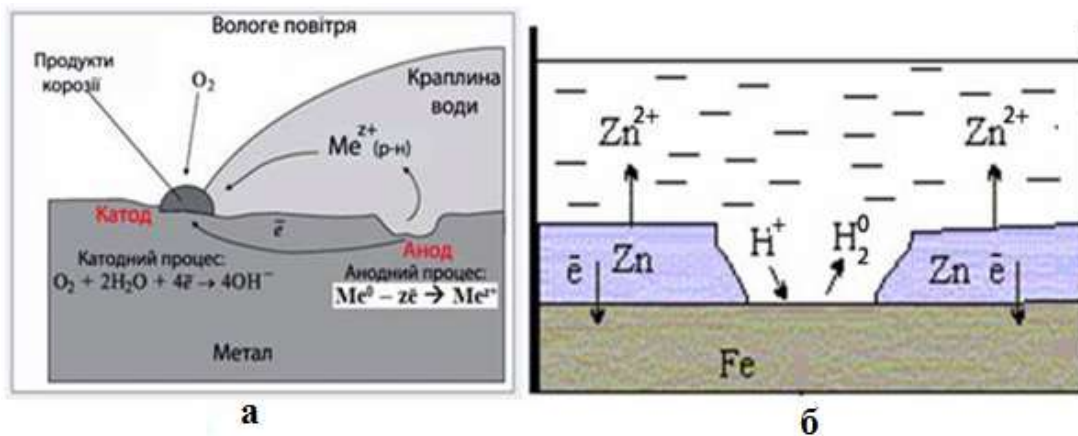


Рис. 8.2. Схема корозії металу: а) з кисневою деполаризацією;  
б) з водневою деполаризацією

### 8.1.1. Фактори, що впливають на швидкість атмосферної корозії

Швидкість корозії і вид корозійного руйнування залежать від природи металу, вологості, забруднення атмосфери (ГОСТ16350–80). В середньому, 60% металів, що кородують припадає на атмосферну корозію.

*Вологість.* В процесі експлуатації машин, обладнання і споруд неминуче зволоження і забруднення їх поверхні, що є першою причиною виникнення і розвитку атмосферної корозії [20].

Отже, основним стимулюючим фактором атмосферної корозії є вода. За відносної вологості повітря до 60% сліди вологи на поверхні металу відсутні. У цьому випадку корозія протікає по хімічному механізму. Утворені на поверхні оксидні плівки мають захисні властивості і гальмують розвиток корозійних руйнувань.

За відносної вологості повітря 60–70%, починається конденсація вологи, і на поверхні металу з'являється адсорбційна плівка води. Відносна вологість, при якій починається конденсація вологи на поверхні металу, називається критичною вологістю. Вона залежить від стану металу і від ступеня забруднення повітря.

За відносної вологості, близької до 100%, або при безпосередньому зволоженні металу (дощ, туман), на поверхні відбувається утворення видимих фазових шарів води.

Зазначені три типи станів значно відрізняються за механізмом перебігу процесу корозії.

В області сухої корозії, як вказувалося вище, реалізується хімічний механізм процесу і швидкість руйнування металів невелика. Зростання оксидної плівки відбувається в перші секунди і хвилини. Після двох–трьох годин подальше потовщення плівки припиняється. Гранична товщина плівок на залізі – 30–40 Å, на нержавіючих сталях – 10–20 Å.

При утворенні адсорбційного шару води (товщиною порядку декількох молекулярних шарів) на поверхні металу з'являється електроліт. У цих умовах реалізується електрохімічний механізм і швидкість корозії значно зростає. Плівка води має невелику товщину, кисень проникає через неї безперешкодно і катодний процес не ускладнений. Анодний процес ускладнюється тим, що продукти корозії екранують поверхню металу. Так як плівка води дуже тонка, то досить істотні омічні втрати, але, в цілому, процес контролюється анодним гальмуванням (Рис.8.3, а) [1, 20].

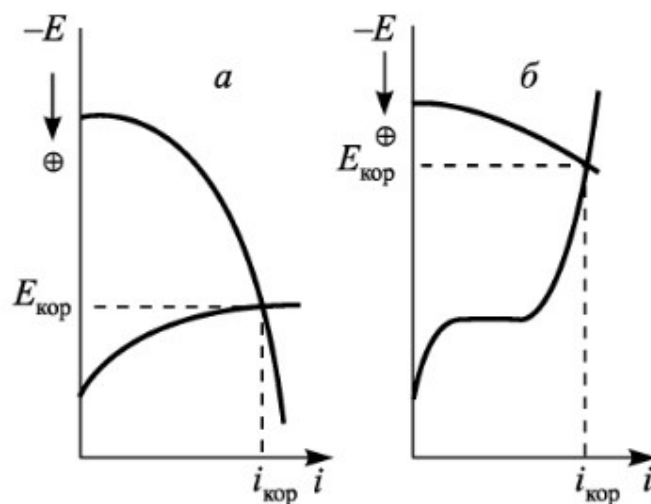


Рис. 8.3. Корозійні діаграми: а – волога корозія ( $\Delta E_a > \Delta E_k$ ); б – мокра корозія ( $\Delta E_k > \Delta E_a$ )

При утворенні фазових плівок в області вологої корозії ускладнюється доставка кисню і спостерігається катодне гальмування процесу (рис. 8.3, б).

Атмосферну корозію, що перебігає під молекулярним шаром вологи (до 10 нм), називають «сухою» атмосферною корозією. Цей різновид корозії характеризується поверхневим окисненням металу за хімічним механізмом взаємодії будь-якого реагенту в газоподібному виді. Наприклад, кисень повітря і сірководень, як домішки у повітрі, взаємодіють із поверхнею металу (тьмяніння нікелевих, цинкових, олов'яних покриттів, латунних виробів, почорніння мідних, срібних покриттів).

Механізм сухої атмосферної корозії аналогічний хімічному процесу утворення і росту на металах плівок продуктів корозії [1, 20].

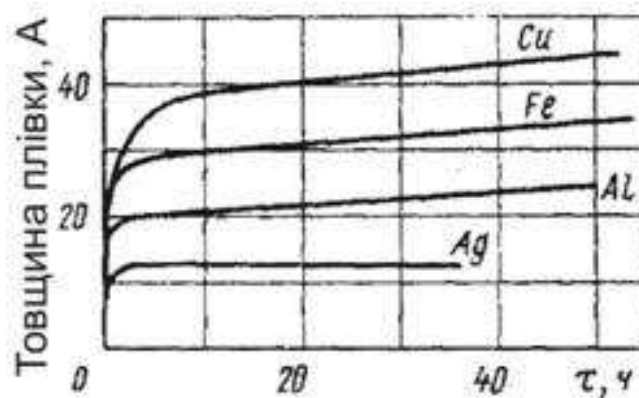


Рис. 8.4. Залежність товщини плівки від часу

Оксидні плівки у результаті «сухої» атмосферної корозії утворюються на металах протягом перших 2...3 годин. У подальшому потовщення їх практично зупиняється (Рис. 8.4). Товщина шару оксидів на сталевих і оміднених поверхнях складає 3...4 нм, на поверхні алюмінієвих сплавів, корозійно-стійких сталей і срібних покриттів – 1...2 нм. Процеси

«сухої» атмосферної корозії не мають суттєвого впливу на збереженість елементів конструкцій, не знижують їхньої працездатності навіть при вмісті у повітрі невеликих кількостей агресивних речовин. Наприклад, повне почорніння поверхні срібних контактів приладів і апаратури може викликати незначне збільшення перехідного опору (до 3%).

Відносна вологість за цих умов складає 30...50%. Значення її досить орієнтовні, оскільки вони залежать від стану поверхні. Подальше підвищення вологості сприяє збільшенню товщини плівки води. Адсорбційні процеси призводять до капілярної конденсації, вода проявляє властивості електроліту, що має вирішальний вплив для процесу корозії. В таких умовах починається «волога» корозія [20].

Залізо і сталь в атмосферних умовах піддаються загальній рівномірній корозії. Характер протікання атмосферної корозії істотно залежить від конструктивних особливостей виробу. Наявність вузьких щілин і зазорів, у яких можливі капілярна конденсація і застоювання вологи, посилюють атмосферну корозію і можуть привести до утворення корозійних виразок (Рис. 8.5).

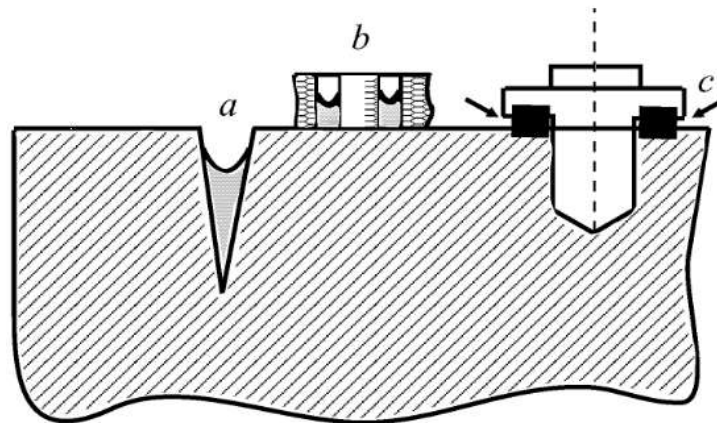


Рис. 8.5. Вплив конструктивних особливостей виробів на центри капілярної конденсації вологи і посилення атмосферної корозії. *a* – щілина в деталях конструкції; *b* – пори в захисному покритті чи в оксидній плівці; *c* – нещільності в різьбових і гвинтових з'єднаннях

*Склад атмосферного середовища.* Забруднення атмосфери газами, пилом різко прискорює корозію. Це явище спостерігають в промислових центрах, особливо за присутності у повітрі  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HCl}$  [19, 20].

Виявлено різко стимулюючий корозію вплив низьких концентрацій  $\text{SO}_2$ . Так, присутність в атмосфері  $\text{SO}_2$  в концентраціях 15–35  $\text{мкг/м}^3$  збільшує швидкість корозії в десятки і сотні разів. В цей же час високі концентрації  $\text{SO}_2$  збільшують швидкість корозійних руйнувань тільки в 5–7 разів.

*Температура повітря.* Швидкість корозії з температурою зазвичай зростає, оскільки з ростом температури збільшується кінетика електрохімічних реакцій, які обумовлюють корозійний процес.

Оскільки, коефіцієнт дифузії кисню з температурою збільшується, а товщина дифузійного шару зменшується (внаслідок посилення само розмішування, обумовленого конвекцією), то підвищення температури повинно призвести до зростання граничного дифузійного струму і, відповідно, швидкості корозії.

Необхідно, також, мати на увазі те, що при корозії металів в атмосфері зі зміною температури змінюється тривалість контакту електроліту з металом. Тому загальний корозійний ефект залежить від зміни кінетики електродних реакцій і від зміни часу передування електроліту на поверхні металу.

Зважаючи на наявність двох факторів, що діють в прямо протилежному напрямку (тривалість контакту металу із електролітом зменшується з підвищенням температури, а швидкість реакцій, обумовлюючих корозійний процес, збільшується), залежність швидкості атмосферної корозії від температури є досить складною і її не завжди легко передбачити [19, 20].

У роботах Ю.М. Михайловського запропонована фізико–механічна модель атмосферної корозії, яка дозволяє пов'язати інтенсивність корозійних руйнувань з параметрами навколишнього середовища. Це слугує основою для прогнозування корозійної поведінки металів і розробки способів їх захисту.

Стійкість металів до атмосферної корозії залежить від їх хімічної природи і стану поверхні. Нижче наведені наближені дані по стійкості деяких металів в міській атмосфері (табл. 8.1) [20].

*Таблиця 8.1. Стійкість металів в атмосфері*

Метал	Pb	Al	Sn	Cu	Ni	Zn	Fe
Швидкість корозії, мм/рік	4	8	12	12	32	50	200

Для захисту від атмосферної корозії використовують різні органічні, неорганічні металеві покриття. Ефективним є легування сталі невеликими кількостями міді, нікелю, фосфору і хрому.

### **8.1.2. Захист металів від корозії в атмосфері**

Сучасна техніка потребує використання металевих виробів у широкому діапазоні температур і тисків, а іноді ще й в агресивних середовищах. Для запобігання чи повного усунення корозії застосовуються численні методи захисту металів.

Захист металів від корозії полягає у комплексі заходів для збільшення працездатності та надійності металів і конструкційних матеріалів за умов їх експлуатації.

Боротьба з корозією починається ще на першому етапі створення будь–яких об'єктів і споруд, складовими частинами яких є металеві вузли. Тобто захист від корозії необхідно забезпечувати не тільки на стадіях виготовлення та експлуатації металевих виробів, але і в процесі їх

проектування. Раціональне обрання певних матеріалів та їх сполучень для виготовлення тієї чи іншої деталі диктується у першу чергу технічною і економічною доцільністю, але одночасно й урахуванням корозійної стійкості виробу. З цієї причини при проектуванні слід дотримуватися певних правил [20]:

- без відповідної ізоляції не допускати поєднання металів, які істотно відрізняються значеннями електродних потенціалів;
- при застосуванні неметалевих поруватих покривних матеріалів, здатних адсорбувати вологу, їх необхідно просочувати дьогтем чи бітумом;
- у металевих конструкціях слід уникати зазорів, щоб запобігти виникненню осередків корозії внаслідок роботи пар диференціальної аерації;
- при сполученні конструкційних елементів перевагу слід віддавати зварним з'єднанням;
- на виробках, які підлягають нанесенню лакофарбових покриттів, необхідно уникати гострих кутів, які містять внутрішні напруження.

Під час експлуатації металевих виробів вибір конкретного методу захисту зумовлюється його ефективністю та економічною доцільністю. Залежно від специфіки всі методи поділяються на три великі групи: дія на метал, дія на корозійне середовище та електрохімічні методи.

Для захисту металів від атмосферної корозії широко використовують нанесення різних захисних **неметалічних(органічних) покриттів**:

- *Змащування* – нанесення мастил, стійких до окиснення у випадку необхідності консервації металевих виробів.
- *Лакування* – нанесення на поверхню металу високомолекулярних сполук, розчинених у леткому розчиннику. Після випаровування



розчинника на металі залишається полімерний шар, який не пропускає окисників з оточуючого середовища і має електроізоляційні властивості.

– *Фарбування* – утворення полімеру безпосередньо на поверхні металу. Фарбування належить до найпоширеніших методів захисту металів від корозії, завдяки низькій вартості, простоті застосування, легкості реставрації та можливості сполучення з іншими методами захисту. Однак цей метод має свої недоліки: недостатню термостійкість і невисоку механічну міцність. Лакофарбові покриття не можуть бути абсолютним бар'єром для корозійного середовища, оскільки вони здатні тільки гальмувати розвиток корозійного процесу, але не зупиняти його.

– *Футерування полімерними матеріалами* – утворення на металі захисного шару з ізолювальними та декоративними властивостями. Наприклад, нанесення гумового покриття на поверхню сталі при виробництві хімічної апаратури.

**Неметалеві неорганічні** покриття виявляють захисну дію в ізоляції металу від оточуючого середовища і можуть мати різну природу [19]:

– Бетонні покриття використовують для захисту громіздких металевих споруд та підземних комунікацій.

– Неорганічні емалі за своїм складом належать до силікатних матеріалів. Емалюванню піддають чорні та кольорові метали, які застосовуються при виробництві апаратури у фармацевтичній, хімічній чи харчовій промисловостях та при виготовленні речей побутового вжитку. Основною вадою силікатних емалей є крихкість та розтріскування під дією теплових і механічних напружень.

– Оксидні плівки (рис. 8.6) нарощують на металах, схильних до пасивації (Al, Ti, Fe, Cr).

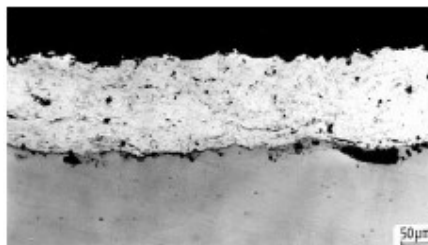


Рис. 8.6. Вигляд під мікроскопом: оксидна плівка на поверхні металу

А також, **металічних** (цинкових, нікелевих, багатошарових) покриттів, що володіють захисними властивостями.

## 8.2. Ґрунт як корозійне середовище

Ґрунт являє собою зовнішній шар гірських порід, який природно утворюється у результаті процесів вивітрювання гірських порід і ґрунтоутворення, що йдуть одночасно і зумовлені діяльністю мікроорганізмів і рослин. Товщина ґрунтового шару складає приблизно 2 м, в окремих випадках – 5–7 м [19, 20].

Ґрунт – це гірські породи, розташовані нижче зони життєдіяльності більшості мікроорганізмів і рослин що не піддається вивітрюванню. Так як вологий ґрунт є гетерогенною капілярно–пористою, а часто і колоїдною системою, його можна вважати провідником другого роду (електролітом), тому процес корозії металу можна розглядати з позиції електрохімічної теорії. Ґрунт – йонний провідник електричного струму навіть при мінімальній вологості, тобто за наявності в ґрунті лише зв’язаної води (хімічно або фізико–хімічно).

Підземна електрохімічна корозія – це самовільне руйнування металу внаслідок його взаємодії з корозійним середовищем (розчином ґрунтового електроліту), при якій іонізація атомів металу і відновлення окиснювальної компоненти корозійного середовища протікають не в одному акті і їх швидкості залежать від електродного потенціалу.

Електрохімічна корозія супроводжується протіканням електричного струму.

Для підземних споруд, що прокладені безпосередньо в ґрунті, характерні наступні види електрохімічної корозії.

Підземна корозія – корозія в ґрунтах, що викликана електрохімічними мікро– і макропарами, які виникають на металі в місцях стикання його з корозійним середовищем. Корозійні пари виникають при неоднорідності металу споруди, неоднорідності структури ґрунту або складу електроліту, відмінності температури, вологості і повітропроникності ґрунту вздовж усієї споруди.

Підземна біокорозія викликається життєдіяльністю мікроорганізмів, які чинять дію на метал. Зазвичай цей процес завершується електрохімічною корозією [19, 20].

Електрокорозія – корозія металічної підземної споруди, викликана проникненням на споруду струмів витоку з рейок електрифікованого транспорту або інших промислових електроустановок і споруд. Має два різновиди:

- Корозія блукаючими струмами – електрохімічна корозія металу під дією блукаючого струму;
- Корозія зовнішнім током, яка перебігає при протіканні через металі електроліт електричного струму від стороннього джерела.

Взаємодію ґрунтового електроліту з металом при будь-якому з видів електрохімічної корозії можна розділити на два процеси: анодний і катодний (Рис. 8.7) [19].

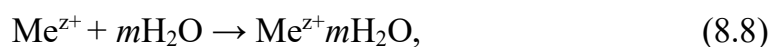


Рис. 8.7. Модель корозійного мікроелемента

Анодний процес полягає у переході металу анода в електроліту вигляді катіонів, при чому еквівалентна кількість електронів залишається у металі:



Катіони металу, переходячи в електроліт, утворюють гідратовані іони:



де  $m$  – кількість молекул води в гідратованому вигляді,  $z$  – кількість електронів.

Причому електрони, що вивільнилися переміщуються по металу від анодної ділянки до катодної, де беруть участь у реакції відновлення.

Катодний процес супроводжується поглинанням надлишкових електронів деполаризаторами електроліту (атомами, молекулами або іонами, які можуть відновлюватися на катоді) [19].

Здебільшого при підземній корозії деполяризація відбувається за рахунок розряду в кислих середовищах іонів водню (воднева деполяризація) та іонізації атомів кисню (киснева деполяризація).

Воднева деполяризація в кислих середовищах відбувається за реакцією [1]:



Киснева деполяризація відбувається за наявності кисню в електроліті, при цьому утворюються іони гідроксиду:



Так як більшість ґрунтів мають нейтральну реакцію, то процес корозії підземних металічних споруд найбільш часто протікає з кисневою деполяризацією.

Йони  $\text{Fe}^{n+}$  і  $\text{OH}^-$  прямують один до одного і утворюють нерозчинний осад  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , який може розкладатися на окис заліза та воду:



Розділення загальної реакції корозії на два самостійні процеси (анодний і катодний) – наслідок існування іонів в електроліті та вільних електронів у металі.

Між анодними і катодними ділянками протікає електричний струм корозії, зумовлений у металі рухом електронів від анода до катода, а в електроліті – рухом іонів.

Анодні і катодні процеси у більшості практичних випадків проходять на різних ділянках, тобто поверхня кородуючого металу складається з деякої кількості мікро– і макрокорозійних пар и швидкість корозії залежить від числа таких пар та інтенсивності їх роботи. Такий механізм корозії називають гетерогенно–електрохімічним.

При гомогенно–електрохімічному механізмі корозії анодні і катодні процеси перебігають на одній і тій самій ділянці, чергуючись у часі.

За гомогенним механізмом, як правило, кородують чисті метали. Присутність домішок і мікроструктурна неоднорідність сталі, мікроструктурна неоднорідність прилягаючого ґрунту, несуцільність окисних шарів на сталі призводять до виникнення мікрокорозійних елементів [1].

Різний склад електроліту та різні умови аерації у окремих ділянок поверхні металу, контакт різних металів створюють умови для виникнення макрокорозійних елементів. Чітко виражені анодні і катодні зони спостерігаються при наявності блукаючих струмів. Тому підземну корозію доцільно оцінювати за гетерогенно–електрохімічним механізмом.

Загальна швидкість спряженого корозійного процесу, що проходить при одночасному протіканні анодної і катодної реакцій, визначається швидкістю тієї реакції, яка протікає з найменшою інтенсивністю. Процес, кінетика якого визначає швидкість корозії, називається контролюючим.

Катодний контроль спостерігається при корозії металу в більшості щільних і вологих ґрунтів, коли з меншою швидкістю протікає процес деполаризації на катоді.

Анодний контроль характерний для сухих, пухких і гарно аерованих ґрунтів, коли уповільнене відведення позитивних іонів металу від анодної ділянки поверхні споруди [1].

Змішаний катодно–омічний та омічний контроль спостерігається в умовах роботи мікроелементів при нерівномірній аерації, причому при омічному контролі процес корозії уповільнюється здебільшого опором руху іонів у ґрунтовому електроліті протяжної макрокорозійної пари.

При рівності швидкостей іонізації і відновлення настає рівновага системи. Потенціал металу відносно електроліту, при якому настає рівновага і розчинення металу припиняється, називається рівноважним потенціалом.

Швидкість корозії металу залежить від низки властивостей ґрунту: структури, пористості, вологості, мінералізації ґрунтових вод, значення рН, повітрепроникності, питомого електричного опору і температури середовища [19].

Структура і пористість ґрунтів визначають їх вологоємність і водопроникність.

Вологість ґрунту – це ступінь наповнення її водою, рівна відношенню кількості води, що знаходиться в одинці об'єму, до маси сухої твердої речовини у цьому ж об'ємі. Вологість ґрунту суттєво впливає на корозійний процес. Зі збільшенням вологості питомий опір ґрунту зменшується, що стимулює протікання корозійних процесів. Проте при дуже високій вологості повітрепроникність зменшується, що уповільнює корозійний процес. Для кожного ґрунту існує певний інтервал вологості, який відповідає максимальній швидкості корозії, тобто корозійна активність різних при однаковій вологості може змінюватись в широких межах.

За величиною рН розрізняють ґрунти [19, 20]:

- кислі (рН 0...5)
- нейтральні (рН 6...8)
- лужні (рН 9...14)

### 8.2.1. Агресивність ґрунту

До характеристик ґрунту, що визначають його агресивність, відносяться: 1) пористість (аерація); 2) електропровідність; 3) наявність розчинених солей, включаючи деполяризатори та інгібітори; 4) вологість; 5) кислотність або лужність [20].

Пористі ґрунти можуть зберігати вологу упродовж довгого періоду часу і створюють сприятливі умови для аерації. І пористість і вологість сприяють підвищенню початкової швидкості корозії. Проте залежність між швидкістю корозії і пористістю ґрунту ускладнюється тим, що продукти корозії, що утворилися в аерованих ґрунтах, можуть мати більш високі захисні якості, ніж продукти що утворились в неаерованих. У більшості ґрунтів, особливо за відсутності задовільної аерації, корозія приймає форму глибокого пітингу. Подібна локалізована корозія викликає більш небезпечні наслідки в трубопроводах, ніж відносно рівномірна загальна корозія, навіть якщо вона проходить з більш високою швидкістю.

Окрім того, у погано аерованих ґрунтах, що містять сульфати, можуть знаходитися сульфатвідновлюючі бактерії, у присутності яких спостерігається така висока швидкість корозії, яка не зустрічається в звичайних ґрунтах.

У добре аерованих ґрунтах швидкість утворення пітингу, яка спочатку висока, швидко уповільнюється, так як внаслідок вільного доступу кисню окиснення заліза і осадження його гідроокису відбуваються безпосередньо на поверхні металу. Захисна плівка, що утворилася сприяє зниженню швидкості пітингоутворення. Окрім того в погано аерованих ґрунтах спостерігається повільне зменшення початкової швидкості росту пітингів. За цих умов продукти корозії, залишаючись у вигляді сполук двохвалентного заліза, або взагалі не захищають, або



забезпечують зовсім незначний захист кородуючого металу. Навіть в добре аерованих ґрунтах висока концентрація розчинених солей може завадити утворенню захисних шарів продуктів корозії, у результаті чого швидкість корозії не буде знижуватися з часом.

Також аерація може впливати на корозійний процес не тільки за рахунок прямого впливу кисню, а й непрямым шляхом, а саме: зменшення, за рахунок взаємодії з киснем, концентрації присутніх у деяких ґрунтах органічних деполаризаторів, які значно прискорюють роботу локальних елементів.

Позитивний вплив аерації поширюється на ґрунти, котрі містять сульфатвідновлюючі бактерії, так як ці бактерії стають неактивними.

Швидкість корозії зростає зі збільшенням глибини залягання металу у ґрунті. Однак ця залежність поширюється не обмежену глибину, тобто на ділянки, які знаходяться поблизу поверхні.

Присутність іонів  $\text{Cl}^-$  і  $\text{SO}_4^-$  в ґрунті ускладнює утворення суцільних захисних плівок. Високий вміст хлоридів майже завжди супроводжується інтенсивною корозією сталі, вплив сульфатів менший. Для алюмінієвих конструкцій також небезпечна присутність в ґрунті розчинних хлористих солей, а для свинцевих оболонок кабелів небезпечна наявність органічних та азотистих речовин.

Температура середовища суттєво впливає на інтенсивність корозійних процесів. При замерзанні ґрунтової вологи корозійні процеси різко уповільнюються [19].

У відповідності до ГОСТ 9.015–74 корозійну активність ґрунтів по відношенню до сталі підземних споруд оцінюють за питомим опором ґрунту, за втратою маси зразків і густині поляризуючого струму.

Корозійна активність ґрунтів встановлюється за показником, який характеризує найбільшу корозійну активність.

Основні джерела блукаючих струмів в землі – це шляхи електрифікованого рейкового транспорту, який працює на постійному чи змінному струмі промислової частоти (рейки залізних доріг, трамваю, метрополітену), лінії електропередачі за системою «дріт – земля».

### 8.3. Природні води як корозійне середовище

Середовище у якому метал піддається корозії називаються корозійним або агресивним середовищем. Корозійним середовищем може бути розчин електроліту, ґрунтова вода, вода природних водойм (особливо морська), звичайна дощова вода або конденсат (сконденсована волога повітря), у яких завжди розчинена певна кількість вуглекислого газу.

При великому різноманітті природних вод від чистих демінералізованих джерел, річкової і морської води до підземних вод з геотермальних свердловин з вмістом солей до 100 г/л і з температурою до 200–250 корозія у більшості випадків перебігає за електрохімічним механізмом із катодним процесом відновлення водню [19].



Рис. 8.8. Приклад корозії металу у воді

Найбільш поширене корозійне середовище – морська вода, що покриває більше 70 % земної поверхні. Більшість конструкційних матеріалів і сплавів руйнуються під дією морської води чи морського

повітря. Тропічні умови є більш жорсткими в порівнянні з арктичними, а середні широти займають проміжне значення.

У прісній воді з малим вмістом розчинних солей швидкість корозії металів менша у порівнянні з морською водою. Відсутність у воді іонів хлору дозволяє використовувати хромисті і хромонікелеві сталі, алюмінієві сплави без небезпеки виникнення виразкової корозії. Невисока електропровідність зменшує шанс контактної і щілинної корозії [20].

Для мінералізованих вод велике значення має наявність розчинених газів, солей жорсткості, значення рН. При великому вмісті вуглекислого газу і сірководню відбувається пришвидшення корозійних процесів. Солі жорсткості можуть захищати метал від корозії при утворенні суцільної плівки і посилювати місцеві види корозії при порушенні суцільності плівки солей.



Рис. 8.9. Підводний трубопровід

Корозійна активність води визначається її фізико-хімічними характеристиками (температурою, хімічним складом). Основним корозійним агентом води є розчинений в ній кисень, а також хлориди і

сульфати. З іншого боку, чинники, що сприяють утворенню щільних карбонатних плівок, знижують корозійну активність води.

Особливо сильно піддається корозії обладнання, що контактує із агресивним середовищем. Таким середовищем виступає морська вода. Морський корозії піддаються: металева оббивка днищ судів, підводні трубопроводи, морська авіація, різні металоконструкції, що знаходяться у воді, металеві конструкції в портах, прокатні валки на блюмінгу, які охолоджуються морською водою і т.п.

Розвиток транспортного і промислового флоту, освоєння глибин океану і прибережного шельфу, опріснення морської води, будівництво прибережних електростанцій, портів і промислових об'єктів, які використовують морську воду, потребують знання корозійних і корозійно–механічних властивостей конструкційних матеріалів, методів і засобів захисту від корозії, а також правильного інженерного вирішення при проектуванні і будівництві морських об'єктів. Щоб правильно вибрати матеріал для морських споруд, конструкцій, суден, трубопроводів і т.п. необхідно враховувати багато факторів. До них відносяться вихідна вартість матеріалів, ефективність їх використання в конструкції, що проектується, передбачуваний термін служби з точки зору корозії, зношування і дії навантажень. У більшості систем, які працюють у морських умовах основні затрати зв'язані з доглядом і ремонтом, необхідними для підтримки обладнання в робочому стані. При експлуатації в морських умовах руйнування багатьох матеріалів відбувається непередбачувано і відрізняється від їх поведінки при лабораторних дослідженнях у сольових розчинах. Хімічні реакції різних матеріалів морською водою достатньо складні. Присутність у воді органічних речовин і живих організмів ще більше ускладнює процеси корозії матеріалів [20].



Рис. 8.10. Морська корозія судна

Морська корозія – один з видів електрохімічної корозії. Морська вода – відмінний електроліт. Вона добре аерована (близько 8 мг/л кисню), має досить високу електропровідність (може досягати  $3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ ). Середовище – нейтральне ( $\text{pH}=7,2\text{--}8,6$ ). У морській воді присутні солі кальцію, калію, магнію, сульфати натрію, хлориди. Особливостями морської корозії є [36]:

1. Велика агресивність морської води і морської атмосфери.
2. Наявність додаткового впливу механічного фактору.
3. Сильний прояв контактної корозії металів.
4. Значний вплив біологічного фактору (обростання металевих конструкцій морськими рослинними і тваринними організмами).





Рис. 8.11. Обростання металевих конструкцій рослинами

5. Наявність на поверхні металу разом з загальною рівномірною корозією глибоких корозійних уражень – виразок.

Особливість морської води, як корозійного середовища визначається в першу чергу вмістом в ній солей. Склад води і загальна солоність світового океану досить постійна. Солоність і склад води внутрішніх морів можуть мати дуже великі коливання. Деякі дані загальної солоності різних морів і океанів представлені в таблиці 2 [36].

Таблиця 8.2. Солоність морів і океанів

Назва водойми	Загальна солоність, %
Атлантичний океан	3,54
Тихий океан	3,49
Середземне море	3,7–3,9
Червоне море	До 4,1
Чорне море	1,7
Азовське море	0,9–1,2
Звичайна річкова вода	0,01–0,03

Склад сольового залишку в морській воді доволі постійний для океанів і більшості відкритих морів. Найбільш типовий склад сольового залишку морської води у відношенні основних її компонентів

Таблиця 8.3. Типовий склад сольового залишку морської води

Сіль	%	Сіль	%
NaCl	77,8	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,5
MgCl <sub>2</sub>	10,9	CaCO <sub>3</sub>	0,3
MgSO <sub>4</sub>	4,7	MgBr <sub>2</sub>	0,2
CaSO <sub>4</sub>	3,6		

Йонний склад морської води

Аніони	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>
% від суми сольового складу	55,04	7,68	0,41	0,19	0,004	0,07
Катіони	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	
% від суми сольового складу	30,61	3,69	1,16	1,10	0,04	

У розчиненому стані завжди присутні характерні для повітря газів: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, інертні газів і ін.

Крім основних катіонів (Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>) і аніонів (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>), в корозійному відношенні можуть мати деяке значення й інші складові морської води, які містяться в далеко менших кількостях, такі як озон, вільні йод і бром (прискорювачі корозії), сполуки силікатної кислоти (можливі сповільнювачі корозії). Крім того, морська вода містить в незначних кількостях ряд інших елементів, які несуттєво впливають на корозію металів і сплавів. Нейтральний характер морської води (рН коливається в межах 7,2–8,6) і велика кількість кисню визначають характер механізму корозії більшості конструкційних металів і сплавів у морській воді. За виключенням магнію і його сплавів, всі конструкційні метали кородують в морській воді з кисневою деполяризацією. У деяких більш рідкісних випадках, як наприклад глибини Чорного моря, морська вода може містити значні кількості сірководню при майже повній

відсутності кисню. В цьому випадку значна корозійна активність морської води повинна пояснюватися вже помітним зростанням ролі водневої деполяризації.

Основні особливості електрохімічних процесів морської корозії можна представити наступним чином [19, 36]:

1. Процеси корозії в морській воді для більшості металів та сплавів (наприклад, залізо, чавун, сталь, цинк, кадмій та ін.) характерні малим анодним гальмуванням і внаслідок цього високою швидкістю корозії. Із цієї причини можливості боротьби з корозією сплавів на основі заліза в морській воді шляхом підвищення анодного гальмування дуже обмежені. Навіть перехід на виготовлення деталей, конструкцій і споруд з нержавіючих сталей не гарантує від корозії: ці матеріали можуть руйнуватися в морській воді за рахунок розвитку піттингової корозії (окремих локальних виразок). Підвищення стійкості може досягатися тільки за рахунок легування сталей компонентами, які підвищують стійкість пасивної плівки по відношенню до хлорид-іону, наприклад добавки молібдену. Значне зниження швидкості корозії сплавів в морській воді можна чекати тільки при умові створення нових конструкційних металів і сплавів, які характеризуються стійким станом в розчинах, що містять хлорид-іони, наприклад сплавів на основі титану, цирконію, танталу, ніобію і ін.

2. Швидкість корозії заліза, чавуну і сталі в морській воді майже цілком визначається катодним гальмуванням. При спокійному стані, або помірній швидкості руху морської води катодний процес контролюється швидкістю доставки кисню до кородуючої поверхні. Це пояснює порівняно малий вплив легуючих добавок і складу низьколегованих сталей на швидкість корозії в морській воді.



3. Внаслідок високої електропровідності морської води для морської корозії характерна велика активність не тільки мікропар (наприклад мікроструктурних включень, пор в захисній плівці), але і макропар. Однак на відміну від ґрунтової корозії для морських умов більш суттєве значення набуває робота корозійних пар, які утворюються за рахунок контактів різномірних металів і наявності на поверхні сталі ділянок з не знятою окалиною [20, 36].

*Таблиця 8.4. Швидкість контактної корозії вуглецевої сталі в залежності від швидкості руху морської води.*

Пара	Швидкість морської води	
	0,15 м/с	2,4 м/с
	Швидкість корозії, мг/дм <sup>2</sup> добу, К	
Сталь–сталь	60	170
Сталь–Х18Н9	141	195
Сталь–титан	139	224
Сталь–мідь	119	525
Сталь–нікель	117	607

### **8.3.1. Основні фактори, що визначають корозійну активність води**

– Збільшення швидкості руху води покращує процес дифузії кисню, що прискорює корозійний процес. Так як морська корозія проходить з кисневою деполяризацією і переважно з дифузійним контролем доставки кисню до катодів кородуючої поверхні, то очевидно, що перемішування або збільшення швидкості руху морської води буде одним з основних факторів прискорення корозійного процесу. Для морської води при збільшенні швидкості її течії, пасивність сталі не настає. При ще більшій швидкості виникає явище корозійної ерозії, а потім і корозійної кавітації [20].

– Температура. Підвищення температури морської води сприяє пришвидшенню корозії внаслідок інтенсифікації електродних процесів,

падіння омичного опору електроліту, збільшення швидкості дифузії кисню, ріст біологічної активності. Разом з тим при нагріві води може відбуватися випадання захисного шару карбонату кальцію і гідроксиду магнію і зменшення концентрації кисню. Одночасний вплив цих факторів веде до того, що підвищення температури до 333 – 353 K в декілька разів пришвидшує корозію заліза; при подальшому підвищенні температури зменшується швидкість загальної корозії внаслідок переважання фактору зменшення концентрації кисню.

- Наявність домішок у морській воді [20, 36].
- Корозія поблизу ватерлінії. Ватерлінія – зона періодичного змочування водою. Морська корозія поблизу ватерлінії завжди носить посилений характер. Це пов'язано з полегшеним доступом кисню до поверхні (посиленою аерацією поверхні металу); агресивним впливом бризок (на місці висохлих бризок залишаються кристалики солі, які перешкоджають утворенню захисних плівок); поверхневий шар морської води більш прогрітий сонячними променями і в умовах посиленої аерації йде посилення корозії металу.



– Рис. 8.12. Корозія поблизу ватер лінії

- Наявність прокатної окалини на сталі. Наявність на поверхні металоконструкції ділянок, неочищених від прокатної окалини в десятки разів може прискорити протікання морської корозії. На поверхні металу виникає гальванопара. У цьому випадку окалина є катодом, а чистий метал – анодом. Проходить анодне розчинення металу. Такий же ефект спостерігається при наявності забарвлених ділянок (по відношенню до непофарбованих) або при порушенні суцільності лакофарбового покриття.
- Зазори і щілини: в них внаслідок поганої аерації посилено протікає анодний процес розчинення металу.
- Механічний фактор: викликає явище корозійної втоми, корозійної ерозії і корозійної кавітації.
- Біологічний фактор. Присутність в морській воді різних мікроорганізмів (бактерії, молюски, корали і т.д.) обумовлює проходження біокорозії металу. Через їх наростання і скупчення на оббивці днищ суден та інших його частинах, до поверхні погано підходить кисень, виникають різні нерівності, відбувається руйнування поверхні, посилене корозійне руйнування у щілинах і зазорах.
- Географічний фактор. Вплив географічного фактору на швидкість корозії металів у морській воді, тобто різниця у характері складу і солоності води, її температури і інших умов, які визначаються місце розміщенням даної акваторії, як правило, не дуже значне [19, 20].

*Таблиця 8.5. Корозія низьковуглецевих сталей при повному занурені у морську воду*

Місцезнаходження станції	$K_{\text{сер.}}$ , мм/рік	$K_{\text{макс. виразок}}$ , мм/рік
Гавр (Франція)	0,11	0,80
Байон (США)	0,10	0,58
Галіфакс (Канада)	0,12	0,13
Окленд (Нова Зеландія)	0,07	0,07

Швидкість корозії металів в різних морських водоймах, як правило, не дуже сильно відрізняється. Невеликі зміни швидкості корозії металів, які спостерігаються, обумовлені головним чином температурним фактором, біологічними причинами і у деяких випадках помітним відхиленням від звичайного складу морської води (наприклад наявність у воді  $H_2S$ , або інших активних домішок. Значення впливу географічного фактору на швидкість корозії низько вуглецевих сталей в морській воді представлено в таблиці 8.5. Як видно із таблиці, швидкість корозії низько вуглецевої сталі в різних районах світового океану відрізняється небагато, максимум у 1,5 рази.

Іноді обростання металоконструкції мікроорганізмами має і позитивний характер. Утворений шар може гальмувати корозійний процес. Так, наприклад, обростання поверхні сталі мідіями значно гальмує корозію металу. Це явище пояснюється значним споживанням мідіями кисню. Крім значного впливу мікроорганізмів на корозійний процес, їх значне скупчення на днищі морського судна може дещо гальмувати його хід, при цьому необхідно збільшувати потужність двигунів. Морській біокорозії найбільш часто піддаються сталі, сплави на нікелевій, алюмінієвій основі, свинець, олово сплави на їх основі. Магній і цинк морській біокорозії можуть не піддаватися. Найкращим матеріалом для застосування в умовах біокорозії можна вважати мідь. Її іони токсичні і поверхня не обростає.

— Контактна корозія частково обумовлена високою електропровідністю морської води. Більшість металів, перебуваючи в морській воді стають катодами по відношенню до сталі.

— Кожний попередній метал цієї таблиці буде в морській воді працювати анодом по відношенню до будь-якого наступного металу, який буде працювати катодом такої пари [36].

Таблиця 8.6. Значення електродних стаціонарних потенціалів у морській воді

Метал або сплав	Е <sub>ст.</sub> , В	Метал або сплав	Е <sub>ст.</sub> , В
Mg	-1,45	Ni	-0,12
Zn	-0,80	Бронза (5–10% Al)	-0,10
Al	-0,53	Cu	-0,08
Fe	-0,50	Нержавіюча сталь X13 (пасивний стан)	+0,03
Вуглецева сталь	-0,40	Ni (пасивний стан)	+0,05
Сірий чавун	-0,36	Нержавіюча сталь X17 (пасивний стан)	+0,10
Нержавіюча сталь X13 і X17 (активний стан)	-0,32	Нержавіюча сталь X18H9 (пасивний стан)	+0,20
Нержавіюча сталь X18H9 (активний стан)	-0,30	Ag	+0,12÷+0,20
Pb	-0,30	Ti	+0,15÷+0,20
Латунь (40% Zn)	-0,20	Pt	+0,40

– Вплив характеру контакту металу з морською водою.

У залежності від умов стикання металу з морською водою швидкість і характер корозійної дії можуть сильно відрізнятися. Наприклад, інтенсивність корозійного руйнування металічної конструкції буде залежати від глибини її занурення у морську воду. Найбільша інтенсивність корозії зразка зануреного в морську воду, спостерігається дещо вище рівня ватерлінії, в зоні капілярного підняття води. Для морських реальних конструкцій ділянка максимальної корозії знаходиться в зоні найбільш частого зрошення поверхні при набіганні хвилі, на верхньому рівні припливу або обприскування. Швидкість корозії в зоні припливу або хвилі в 3–5 раз більша, ніж у зоні повного занурення.

В цих умовах одночасно діє декілька прискорюючі факторів:

- достатнє і періодично відновлювальне зволоження поверхні;
- максимально можлива швидкість дифузії кисню через тонкі шари вологи;

- механічна дія припливних хвиль, що безперервно руйнують шари продуктів корозії, які після деякого потовщення могли би чинити певну захисну дію.
- При поглибленні під ватерлінією швидкість корозії знижується. Однак пропорційного зменшення швидкості корозії з глибиною не спостерігається. Навіть при порівняно великих глибинах швидкість корозії не дуже набагато менша, ніж на глибині 2–3 м нижче рівня води. Це відбувається тому, що доставка кисню в товщу води йде не за рахунок повільного дифузійного процесу, а більш швидким шляхом за рахунок механічного перемішування води (хвилювання, течії), а також завдяки природній конвекції внаслідок опускання вниз верхніх шарів, які поступово стають більш важкими через випаровування, що призводить до збільшення концентрації солей та їх охолодження. Згідно деяких досліджень корозія при повному занурені становить  $\approx 0,18 \text{ г/м}^2 \text{ год}$
- у зоні хвиль і обприскування  $\approx 0,5 \text{ г/м}^2 \text{ год}$ .
- у зоні недосяжній для хвиль і обприскування  $\approx 0,01\text{--}0,05 \text{ г/м}^2 \text{ год}$ .

Електрокорозія суден і морських споруд при проходженні електричного струму через їх підводну частину буває обумовлена двома причинами:

1. неправильними схемами підключення споживачів електричного струму;
2. наявністю в районі стоянки судна або розміщення підводної металічної конструкції блукаючих струмів (робота поблизу морського берега рейкового електротранспорту і т.п.) [20, 36].

### **8.3.2. Захист металів від корозії у природних водах**

Легування сталей більш благородними металами мало впливає на їх корозійну стійкість через наявність хлоридів. Тільки добавка молібдену

може покращити корозійну стійкість нержавіючих сталей [35].

Корозійна стійкість міді в значній мірі визначається позитивним значенням її рівноважного електродного потенціалу (термодинамічною стійкістю), а для її сплавів в деякій мірі також схильністю до пасивації. Швидкість корозії чистої міді при постійному зануренні складає 0,02–0,07 мм/рік, а при перемінному зануренні – 0,02–0,1 мм/рік, тобто приблизно можна рахувати, що стійкість міді при постійному зануренні у 2–5 раз вища ніж простої сталі. При перемінному зануренні перевага міді робиться ще більш помітною. Латуні найбільш стійкі в морській воді при вмісті міді в них порядку 70%. Склад часто застосовуваної морської (адміралтейської) латуні 70%Cu, 29%Zn і 1%Sn. Латуні з більш високим вмістом міді схильні до виразкової корозії і роз’їданню по ватерлінії, з меншим вмістом міді—до знецинкування [34, 35].

Із алюмінієвих конструкційних сплавів найбільше застосування в морських умовах мають литі сплави на основі системи Al–Si (сілуміни), Al–Mg (магналії) і Al–Mn. Ці сплави володіють достатньою корозійною стійкістю при умові додаткового захисту лакофарбовими покриттями.

Магній і магнієві сплави через їх підвищену активність у середовищах, що містять хлоридні-іони, як правило, не застосовуються в якості конструкційних матеріалів в морських умовах. Застосовуються протектори з магнієвих сплавів. Цинк і цинкові сплави майже не знаходять самостійного застосування для морських конструкцій. Цинк застосовується в якості захисних покриттів. Титан і його сплави володіють абсолютною корозійною стійкістю у морських умовах.

Другорядні складові морської води можуть мати доволі суттєве значення. Кремнекислі сполуки і вуглекислий кальцій дають осади на металі, які можуть захищати метал від корозії. Йод і бром навіть при дуже малому вмісті їх у морській воді можуть грати роль додаткових катодних

деполяризаторів і прискорювати корозію металів. Сірководень в придонній області може негативно впливати на корозійну стійкість металів, підкислюючи морську воду і зв'язуючи іони металів у важкорозчинні сульфіді, тобто полегшуючи протікання катодного і анодного електродних процесів електрохімічної корозії.

Прокатна окалина на сталі в морській воді грає роль ефективного катоду, що може збільшити корозію металів в десятки разів. Таку ж роль катодів можуть грати пофарбовані ділянки металу по відношенню до непофарбованих ділянок [34, 35].

До найбільш розповсюджених способів захисту металів і сплавів від корозії в морській воді відносяться [36]:

1. Видалення прокатної окалини зі сталюого листа хімічним травленням, піскоструминною очисткою або полум'ям.

2. Застосування лакофарбових покриттів на вініловій, фенолформальдегідній, кам'яновугільній, бітумній основі. Для підготовки металічної поверхні під покриття застосовують холодне фосфатування. Підводну частину морських суден додатково покривають необростаючими фарбами, в склад яких входять речовини токсичні для морських організмів такі як купрум(II) оксид, меркурій (II) оксид та ін.



Рис. 8.13. Фарбування кораблів



3. Для захисту від морської корозії дуже часто використовують металеві захисні покриття. Найпоширеніше – цинкове. Товщина цинкового покриття повинна становити близько 150 – 200 мкм. Його можна використовувати як самостійне захисне покриття, так і в якості основи під фарбування. Для оббивки днища морського судна може використовуватися легований лантаном або цинком алюміній. Алюмінієве покриття має високу стійкість до корозії, його можна застосовувати у комплексі з лакофарбовим покриттям. Крім того алюмінієві покриття мають підвищену стійкість до ерозії.

4. Застосування електрохімічного захисту (протекторний і від зовнішнього джерела постійного струму) у комбінації з захисними покриттями, або як самостійний засіб захисту від корозії.

5. Рациональне конструювання, наприклад рівномірний розподіл напружень в конструкції, виведення відповідальних елементів з зони періодичного змочування, усунення контактної корозії.

6. Електрокорозію морських суден і споруд можна попередити застосуванням схем живлення струмом, які виключають електрокорозію і дренаванням [20, 36].

7. Для захисту металоконструкцій від морської біологічної корозії застосовують лакофарбові матеріали з біоцидними добавками. Також є дані про використання методу ультразвукової захисту. Недоліком методу є значне споживання енергії і поступове руйнування матеріалу, що захищається. Суть методу полягає у впливі на поверхню, що захищається ультразвукових коливань, що мають частоту 23 – 27 кГц.

Для комплексного захисту сталі від морської корозії можна застосовувати ультразвуковий і катодний захист одночасно.

## **8.4. Біокорозія та біопшкодження**

Мікробіологічна корозія (біокорозія) – процес корозійного руйнування металу за умов дії на нього мікроорганізмів. Ініціювання процесів електрохімічної корозії металів пов'язане з життєдіяльністю бактерій та грибів. Частіше за все біокорозія протікає спільно з атмосферною або ґрунтовою, у водних розчинах або в неелектролітах, ініціює та інтенсифікує їх. У результаті протікання біокорозії на поверхні металу з'являються невеликі заглиблення (шорохуваті або блискучі), раковини, нерівності, які можуть бути заповнені продуктами корозії. Біокорозія у більшості випадків є пітинговою або виразковою [2, 29].

### **8.4.1. Види біологічної корозії**

Біокорозія поділяється на бактеріальну та мікологічну. Іноді руйнування може бути викликане присутністю у корозійному середовищі дріжджів, інших мікроорганізмів. Усі мікроорганізми поділяються на аеробні та анаеробні. Аеробні існують і розмножуються лише при наявності кисню. Анаеробним для нормальної життєдіяльності кисень не потрібен. Серед аеробних мікроорганізмів найбільш небезпечними є сіркобактерії та залізобактерії (живуть у ґрунті). В природних умовах аеробні та анаеробні бактерії існують спільно.

Частіше за все протікає бактеріальна корозія. Вона є найбільш руйнівною. Даний ви зустрічається у воді, ґрунті, паливі при наявності бактерій. Бактерії дуже швидко розмножуються та легко пристосовуються до умов навколишнього середовища [1].

### 8.4.2.Класифікація біопшкоджень

Усі види біопшкоджень перебігають за досить складними механізмами. Мікроорганізми частіше за все лише стимулюють корозійний процес, але й можуть безпосередньо руйнувати матеріали.

Класифікація біопшкоджень за природним середовищем мікроорганізмів [2, 29]:

- у водних середовищах;
- у ґрунті;
- у космосі;
- в органічних середовищах (продукти нафтопереробки і т.п.);
- у повітряному середовищі (наземному).

Біокорозія – характерний процес руйнування металу обладнання в промисловості. До біопшкоджень схильні підземні споруди, метро, обладнання нафтової промисловості, паливні системи літаків, трубопроводи при контакті з ґрунтом і водними середовищами, елементи конструкцій машин, захищені консерваційними матеріалами і лакофарбовими покриттями. Аналіз показує (табл. 8.7), що проблема захисту металоконструкцій від біопшкоджень та біокорозія має міжгалузеве значення.

Таблиця 8.7. Відомості про корозію обладнання та споруд

Об'єкти	Корозія	Основні групи мікроорганізмів
Трубопроводи, теплообмінники, бурові установки, резервуари, обладнання переробки нафти та газу.	Локальна, нерівномірна, виразками та пітингами	Сульфовідновлюючі та інші бактерії
Конденсатори, теплообмінники, обладнання систем водопостачання хімічної та перероблюючої промисловості	Нерівномірна, виразками та пітингами	Залізобактерії та ін.
Обладнання паливних систем, двигуни, несучі поверхні, особливо поблизу систем заправки літаючих апаратів	Локальна, розшаровуюча, виразкова корозія	Сульфатвідновлюючі та інші бактерії
Підводні поверхні суден,	Локальна, виразкова	Морские обрастатели,

теплообмінне обладнання, ємності танкерів		бактерії
Будівлі, мости, інші будівельні споруди	Нерівномірна металів і бетону	Гриби, бактерії
Металічні і залізобетонні конструкції енергетичних споруд	Нерівномірнв металів і бетону	Гриби, бактерії
Система водного охолодження турбін електростанцій	Локальна, виразкова	Залізобактерії та ін.
Системи каналізації і водопостачання промислового і комунального призначення	Локальна виразкова	Залізобактерії та ін.
Медицинська техніка	Локальна пітингова	Бактерії, гриби, актиноміцети
Вироби, прилади електронної, електротехнічної, радіотехнічної промисловості	Локальна пітингова, вибіркова, контактна	Бактерії, гриби, актиноміцети
Обладнання, будівельні конструкції мікробіологічної промисловості	Локальна пітингова, вибіркова, контактна	Бактерії, гриби
Обладнання харчової промисловості	Локальна пітингова, вибіркова, контактна	Бактерії, гриби
Будівельні споруди і техніка сільського господарства	Нерівномірна металів та бетону	Бактерії, гриби

Корозійні ефекти за участі мікроорганізмів аналогічні іншим видам корозії. Наприклад, подібно до локально зосередженої корозії у результаті біопшкоджень утворюються блискучі або шорохуваті пласкі малопомітні заглиблення, особливо під шламом або тонкими оксидними плівками, а також раковини різної глибини під шаром продуктів корозії. Характерні ознаки біопшкоджень різних матеріалів приведені у табл.8.8 [2, 29].

Таблиця 8.8. Характерні ознаки біопшкоджень

Матеріал	Характерні ознаки біопшкоджень	Мікроорганізми
Метал, сплав, металопокриття	Шорсткі, малопомітні заглиблення, іноді під шламом продуктів корозії, виразкові заглибини кратероподібної форми, іноді наскрізні з рясним нальотом продуктів корозії; чорна сухий шар або пастоподібна речовина з білими або сірими включеннями	Бактерії, гриби, продукти їх життєдіяльності
Полімер	Тьмяна поверхня, втрата глянцею, іноді знебарвлення або поява кольорових плям; тонкі, ледь помітні візуально нальоти зволжених ділянок; візуально помітні нальоти міцелію (порошкоподібні, сітково переплетені накопичення); зміна діелектричних властивостей електроізоляційних матеріалів;	Бактерії, актиноміцети, гриби

	набухання і зміна форми деталей; затвердіння, окрихчування, розтріскування і викрашування матеріалів.	
Лакофарбові покриття (ЛФП)	Плями на поверхні, утворення бугристості; візуально помітний наліт, розвиток мікроорганізмів всередині плівки і під нею; зміна фізико–механічних властивостей покриття ( втрата еластичності, міцності, відшарування, розтріскування); утворення і накопичення продуктів корозії під плівкою; наскрізні пітинги у плівці покриття	Бактерії, актиноміцети, гриби
Еластомери, каучук, гума	Тьмяна поверхня, слизові плями, пігментація, специфічний запах, сітка дрібних тріщин з поверхневим нальотом темного кольору; наліт міцелію грибів, візуально помітного; зниження герметизуючих властивостей ущільнюючих матеріалів, зниження діелектричних якостей, електроізоляційних матеріалів; набухання і зміна форми деталей	Бактерії, актиноміцети, гриби
Будівельний матеріал (деревина, камінь, бетон, цегла, зв'язуючи)	Поява кольорових плям; візуально помітний наліт (порошкоподібний); зниження механічної міцності матеріалів; розм'якшування та викришування матеріалів	Бактерії, гриби, актиноміцети та ін.
Паливо, мастило, паливо–змащувальні матеріали	Пухкі нальоти, що відрізняються за кольором і консистенцією в поверхневих шарах змащувального матеріалу, в об'ємі палива або на межі поділу водного та паливного шарів; розшарування рідких продуктів, помутніння, випадіння осадів; утворення стійких емульсій, зниження експлуатаційних якостей продуктів, нальоти корозії на поверхнях елементів металоконструкцій	Бактерії різних видів, рідше – гриби та ацциноміцети

Біокорозію поділяють на бактеріальну, протікаючу у водних середовищах за наявності особливого виду бактерій (у ґрунті, воді, паливі), мікробіологічну (грибну) – в атмосферних умовах, при контакті з ґрунтом, при зволоженні поверхні, за наявності забруднень, спор, міцелію та продуктів життєдіяльності грибів. Можливий вид біокорозії при сумісній і почерговій дії вказаних мікроорганізмів, актиноміцетів, дріжжів.

Мікроорганізми можуть впливати на метали з високою корозійною стійкістю. Присутність мікробів у розчинах нейтральних солей середніх

концентрацій призводило до катастрофічних руйнувань обладнання з кислотостійких сталей, алюмінієвих сплавів, свинцю [2, 29].

Бактеріальна корозія може відбуватися при 6...40°C, рН=1...10,5 у присутності органічних і неорганічних сполук, що включають вуглець, сірку, азот, фосфор, калій, залізо, водень, кисень та ін.

Руйнування металу пов'язана з наступними причинами: на поверхні металу утворюються різні електрохімічні концентраційні елементи; у розчині чи на поверхні металу створюються агресивні хімічні сполуки; змінюються електрохімічні потенціали середовища у зв'язку зі зміною концентрації кисню у розчині.

Бактерії швидко розмножуються і легко пристосовуються до фізичних, хімічних, біологічних умов середовища, які швидко змінюються.

Мікроорганізми, які у якості джерела енергії використовують неорганічні речовини, виділяють в особливу групу літотрофних бактерій. О таких бактерій відносять [2, 29]:

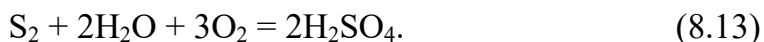
- водневі, що окислюють водень з утворенням води;
- нітрифікуючі, що окислюють аміак до азотної кислоти (*Nitrosomonas*, *Nitrosocystis*, *Nitrobacter*)
- тіонові, що окислюють сірководень до елементарної сірки, яка накопичується всередині клітин, або елементарну сірку до сірчаної кислоти (*Thiobacillusthiooxidans*) або сірчаноокисле залізо до окисного у кислому середовищі (*Thiobacillusferrooxidans*);
- залізобактерії, які окиснюють закисне залізо до окисного (*Gallionella*) та ін. в нейтральних середовищах;
- метаноутворюючі, що стимулюють природний синтез метану з вуглекислоти і водню в анаеробних умовах;

- сульфатвідновлюючі (СВБ), життєдіяльність яких відбувається за рахунок процесу відновлення сульфатів до сірководню. Потребують органічних речовин, наприклад, вуглеводнів; СВБ – основні руйнівники нафти та нафтопродуктів, суттєво впливають на корозію металів (*Desulfovibriodesulburicans*, *DesulfovibrioVulgaris*, *Desulfovibriosabexigenes*, *Desulfovibriogigas*, *Desulfovibrioafricans*, *Desulfovibrioothermophilus* та *Desulfotomaculum* чотирьох видів);

У процесі життєдіяльності вони окислюють сірководень до сірки, а потім до сірководню за рівняннями [2, 29]:



та



Утворена сірчана кислота може викликати інтенсивну біологічну корозію сталевих трубопроводів.

- нітродіновлюючі, що викликають у ґрунті процес денітрифікації – відновлення окислених форм азота за схемою: нітрат – нітрит – азот – аміак (*Thiobacillusdenitrificans* та ін.)

Літотрофні мікроорганізми беруть пряму участь в утворенні корисних копалин (самородна сірка, селітра, пірит, газ). Ці ж мікроорганізми беруть участь у руйнуванні металокопструкцій, стимулюючи процеси переходу і руйнування полімерних і неорганічних матеріалів, утворюючи агресивні середовища.

- бактерії, що поглинають марганець. Продуктам їх життєдіяльності є відкладення на поверхні металу горбків з гідроокислів заліза та марганцю. Під такими горбками в анаеробних умовах виникає корозія металів.

Зазвичай у корозійному процесі беруть участь бактерії багатьох видів спільно обумовлюючи корозію. При цьому анаеробні умови часто

можуть бути створені діяльністю аеробних бактерій. При аерації ґрунту відновлюючі бактерії гинуть, а окислюючі розвиваються.

У природі аеробні і анаеробні бактерії існують поряд. У ґрунтах найбільш інтенсивна корозія спостерігається в болотистих місцях ( $\text{pH}=6,8\dots7,8$ ), насичених органічними залишками зі зниженим вмістом кисню. Поверхня конструкцій, що мають значну протяжність (трубопровід), стає анодною по відношенню до ділянок, що контактують з більш аерованим ґрунтом, і корозія прискорюється. В анодних зонах можливе окиснення гідрозакису заліза залізобактеріями. Бактерії можуть ініціювати корозію міді з утворенням сульфідів [2, 29].

Електрохімічна корозія металів відбувається при деполяризації локальних елементів. В аеробних умовах процес йде за участю кисню повітря (анодне розчинення сталі, катодна деполяризація та утворення продуктів корозії).

## **РОЗДІЛ 9. АНТИКОРОЗІЙНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ**

### **9.1. Рекомендації з антикорозійного обслуговування**

1. Усі заходи щодо захисту від корозії, введені на стадії проектування, повинні бути контрольованими. Їх стан і ефективність протягом усього часу експлуатації слід перевіряти в умовах, що визначаються обраними конструктором геометричними формами об'єкта, його розташування і будовою, і ця перевірка повинна бути по можливості просто і проводитися в умовах виготовлення об'єкта, його експлуатації або обслуговування [39].

2. Всі передбачені протикорозійні заходи повинні бути такими, щоб ремонт або їх повторне проведення були по можливості досить простими з урахуванням місцевості об'єкта і оточуючих його умов.



3. Перевага заміни всього об'єкта (або його окремих елементів) замість повторного ремонту повинна бути встановлена на підставі робочих і економічних параметрів об'єкта.

4. Щоб уникнути серйозних перешкод при обслуговуванні та ремонті, можуть знадобитися корінні зміни ідеї проекту; особливо це відноситься до складних конструкцій, видів споруд і устаткування в корозійноактивних середовищах [32, 33].

5. До протикорозійного обслуговування повинні пред'являтися вимоги: або мінімально можливий час виконання робіт або проведення цих робіт через максимально можливі проміжки часу (наприклад, у випадках утрудненого доступу до обладнання і споруд). Проект повинен бути заснований на оптимальній тривалості протикорозійного захисту.

6. Протикорозійне обслуговування є частиною загальної запланованої програми обслуговування об'єкта при його експлуатації; ця програма повинна виконуватися з найменшими перешкодами для функціонування або використання об'єкта і одночасно з цим повинна бути сумісною з характеристиками корозійної стійкості.

7. Періодичність обслуговування повинна відповідати робочим циклам і створювати мінімально можливі незручності у всіх відносинах.

8. Необхідно вживати всіх можливих заходів, щоб знизити до мінімуму складність і вартість періодичного обслуговування, включаючи демонтаж і подальшу збірку споруд і устаткування, очищення і підготовку поверхонь на місці, запобіжні заходи. Всі ці операції повинні бути легкими і простими.

9. Слід забезпечувати безпеку обслуговуючого персоналу (включаючи легкий доступ до споруди, що обслуговується, або апаратного забезпечення інструментами, спеціальними платформами, тимчасовою вентиляцією, освітленням і т. п.).

10. Деталі, які швидко кородують, не повинні розміщуватися в недоступних місцях усередині об'єкта, так як це змушує обслуговуючий персонал виконувати операції розбирання. Такі деталі або вузли повинні бути легко і просто вилучаються. Деталі, які потребують трудомісткого протикорозійного обслуговування, не повинні розташовуватися в темних місцях.

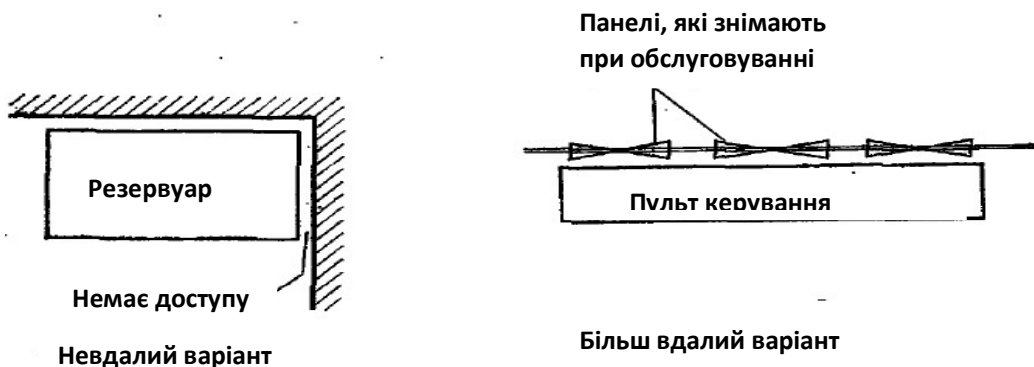
11. Матеріали і системи захисту необхідно вибирати з урахуванням властивості їм економічно обґрунтованої тривалості збереження стійкості до корозії.

12. Доступність для огляду повинна доповнюватись додатковими вибірковими контрольними методами випробувань (наприклад, рентгенівськими, ультразвуковими, візуальними визначеннями із застосуванням зразків, інструментів тощо) [39].

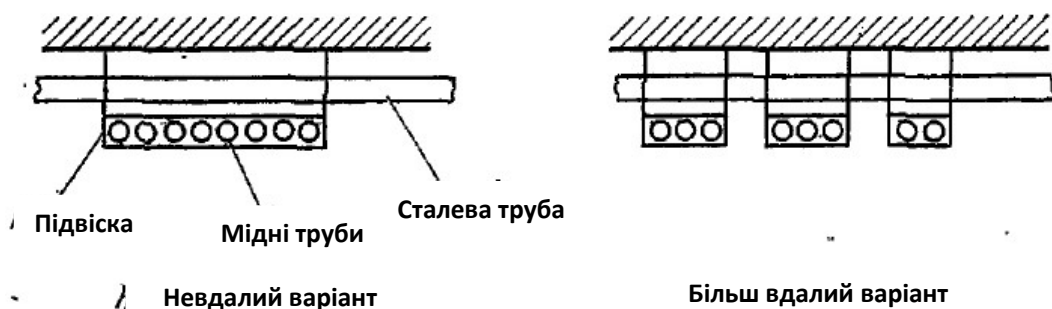
14. Рекомендується застосування модульних блоків, що відповідають вимогам захисту від корозії.

## 9.2.Антикорозійне обслуговування споруд та обладнання

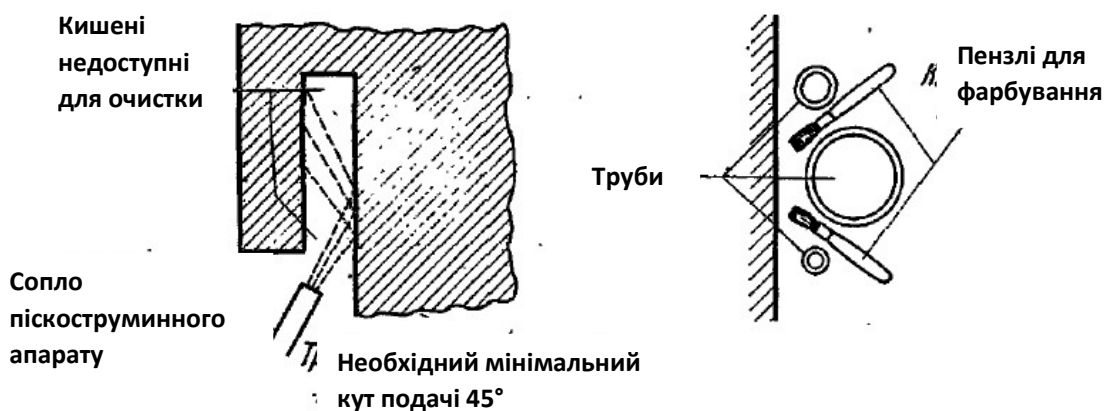
1. При експлуатації споруд і обладнання необхідно забезпечити доступ для обслуговування.



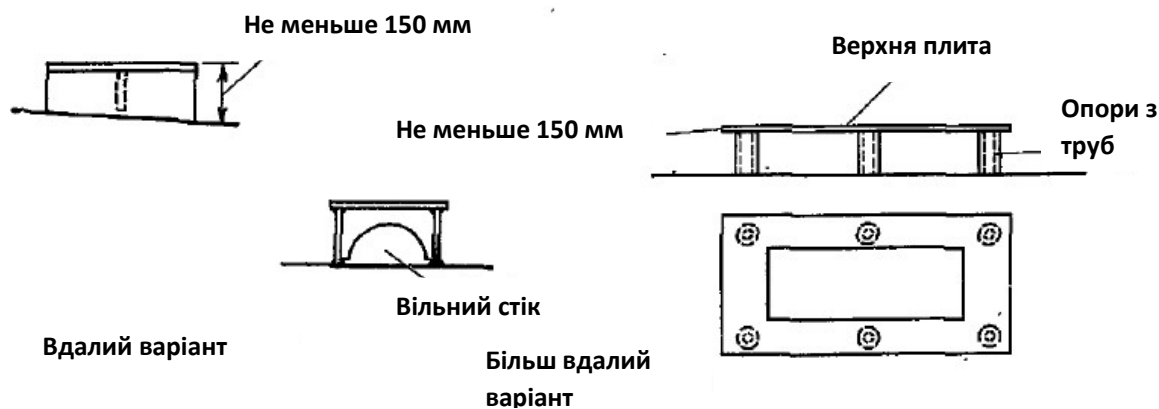
2. Кожухи і інші перешкоди для доступу при обслуговуванні споруди або обладнання слід при необхідності розділити на частини, ширина яких повинна бути зведена до мінімуму [32, 33].



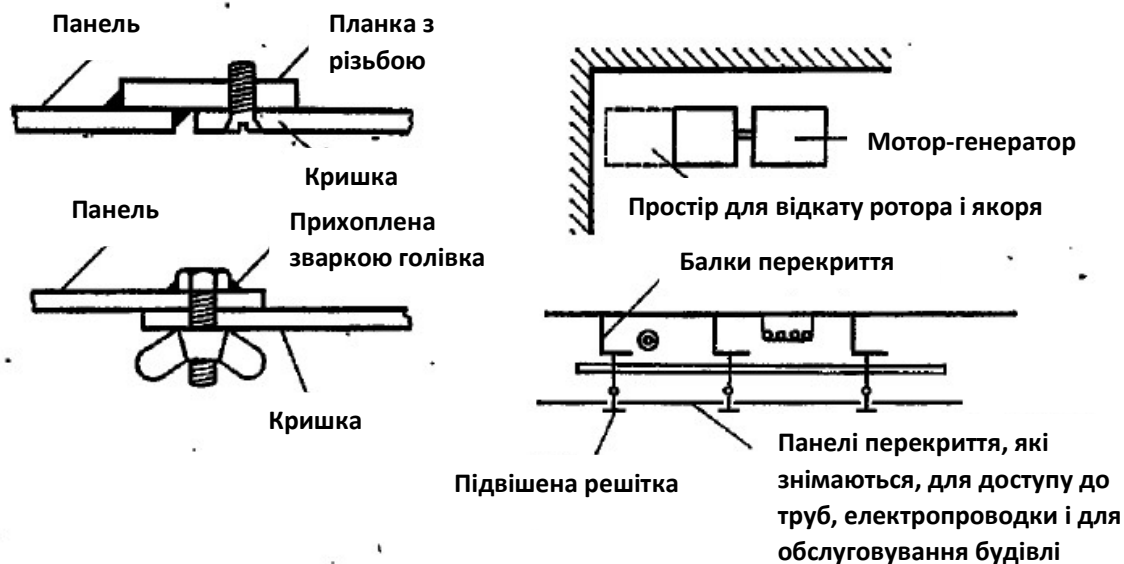
3. Оптимальна відстань між перешкодою і розташованим за ним спорудою або обладнанням залежить від необхідних і наявних коштів і технології обслуговування.



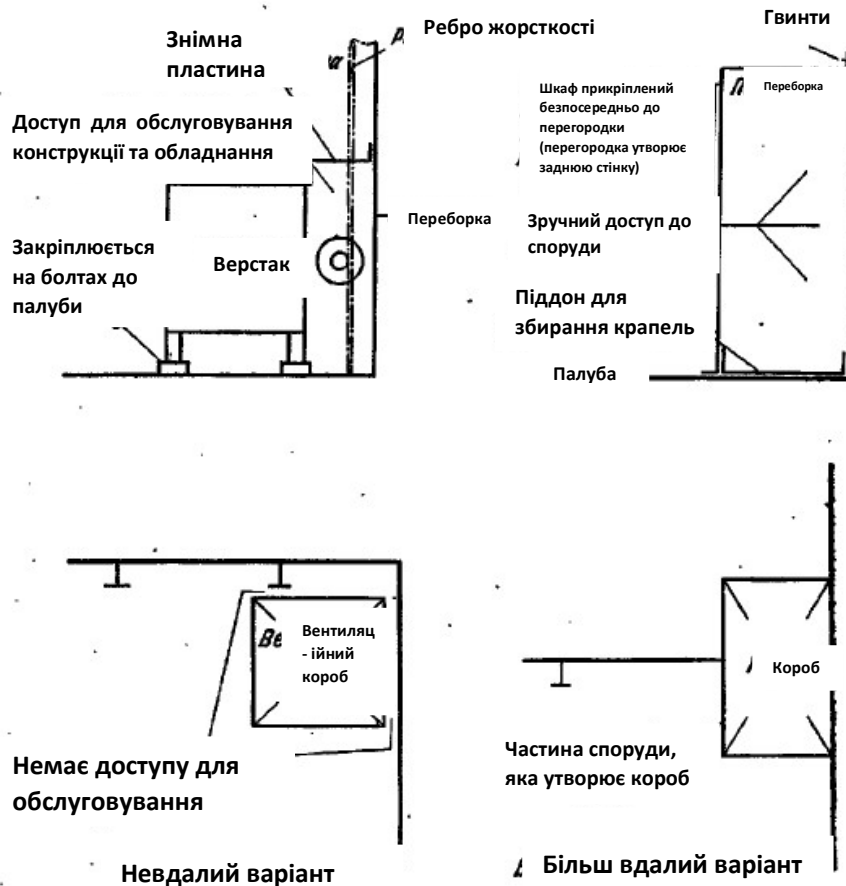
4. Слід уникати надмірно низьких опор для установки устаткування, особливо якщо можливі потрапляння і накопичення електроліту всередині.



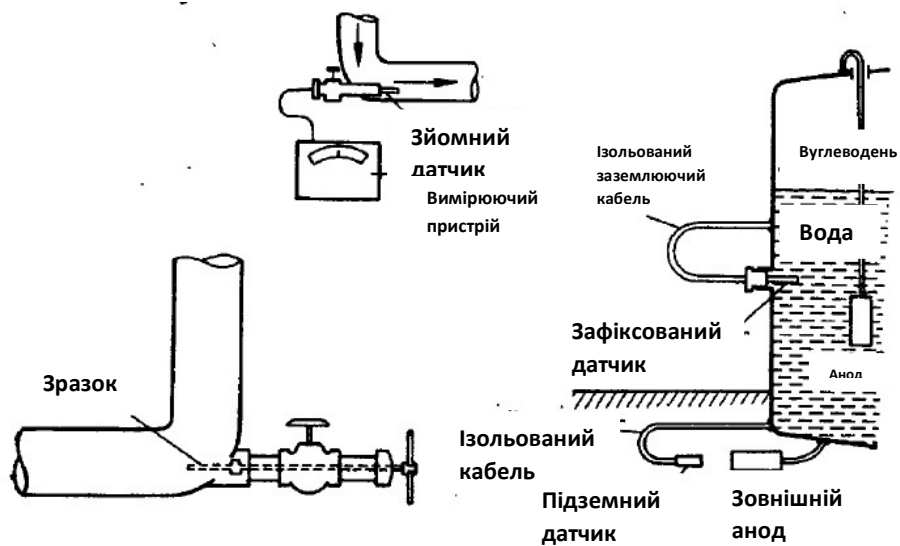
5. Кришки й інші елементи, що підлягають видаленню в процесі обслуговування повинні легко і просто зніматися [32, 33].



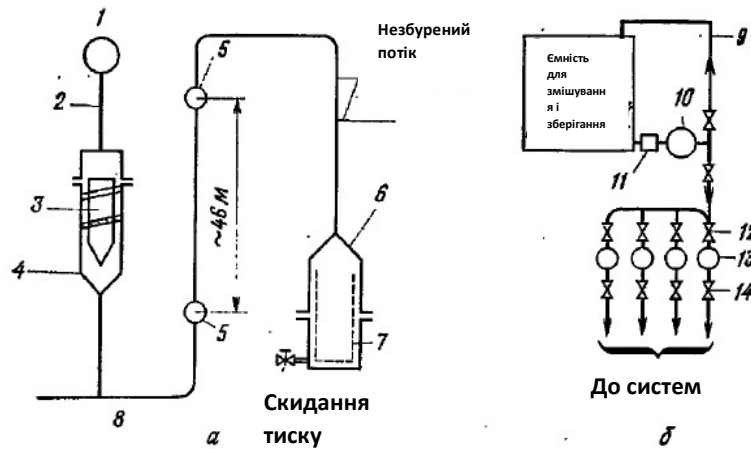
6. За обладнанням, вентиляційними каналами, шафами і рундуками слід передбачати простір для доступу, або всі ці види обладнання повинні бути включені в споруду і бути його частинами. В іншому випадку будь-яке обладнання повинно легко і просто віддалятися, щоб забезпечити доступ до навантажених елементів конструкції [32, 33].



7. Для відповідального обладнання, яке зазнає корозійного впливу середовища, може знадобитися встановлення корозійних зразків, датчиків і корозіометричних приладів [32, 33].



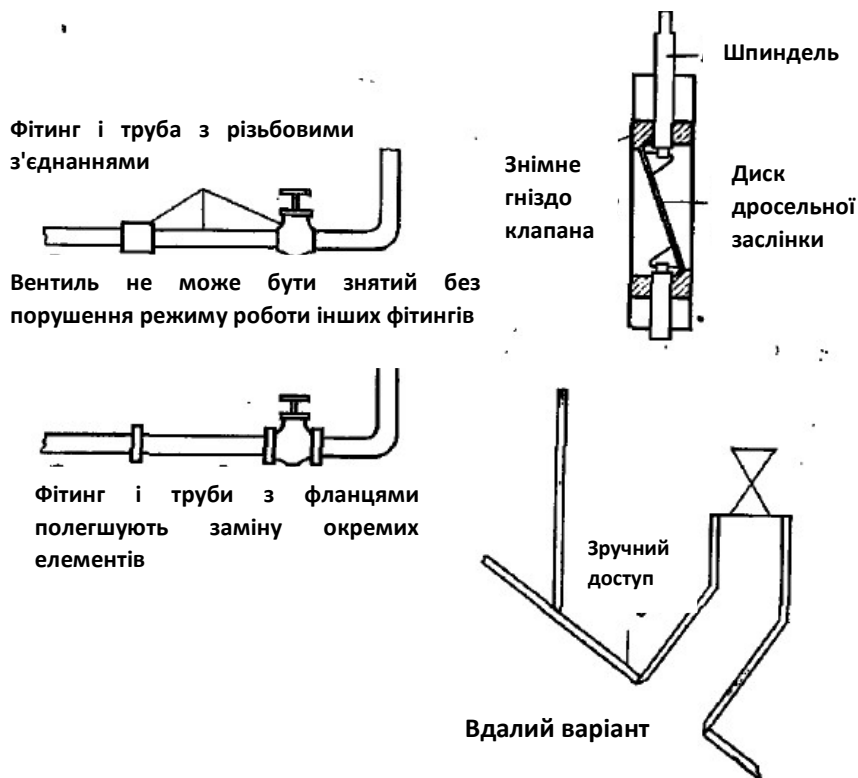
8. Системи трубопроводів повинні по можливості забезпечувати їх очищення без розбирання.



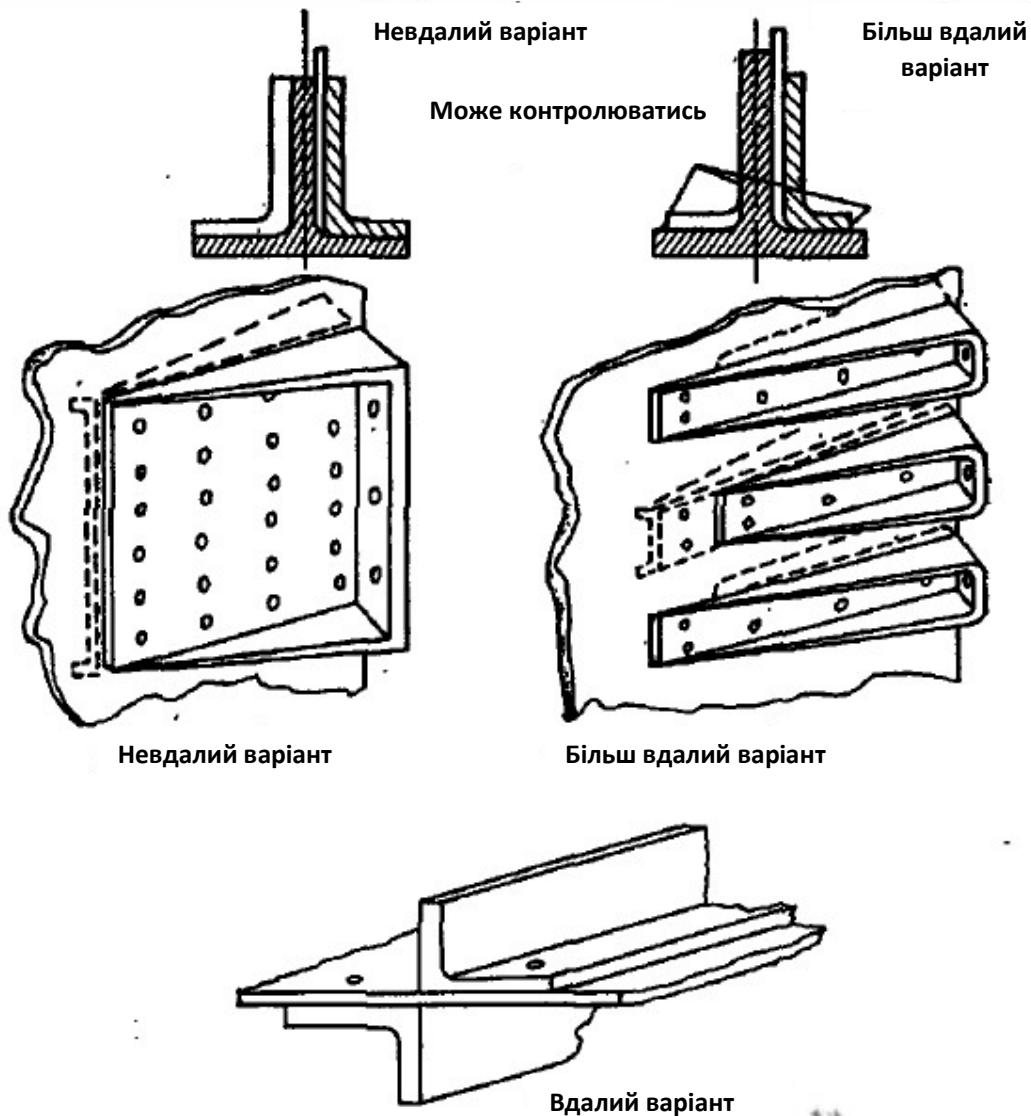
а – прилад гнучкого ворота для очистки труб: 1 – нагнітаючий насос; 2 – нагнітаючий трубопровід; 3 – ворот; 4 – приймаючий конус; 5 – клапан зниження тиску; 6 – приймаюча пастка; 7 – сітка;

б – пристрій для хімічної очистки: 8 – основна лінія; 9 – лінія неперервної циркуляції; 10 – насос; 11 – фільтр; 12 – клапани, які працюють в режимі: відкритий – закритий; 13 – витратомір; 14 – вентилі для регулювання витрат.

9. Відповідальні вузли або вузли систем, що піддаються сильному корозійного впливу, слід демонтувати незалежно один від одного [32, 33].

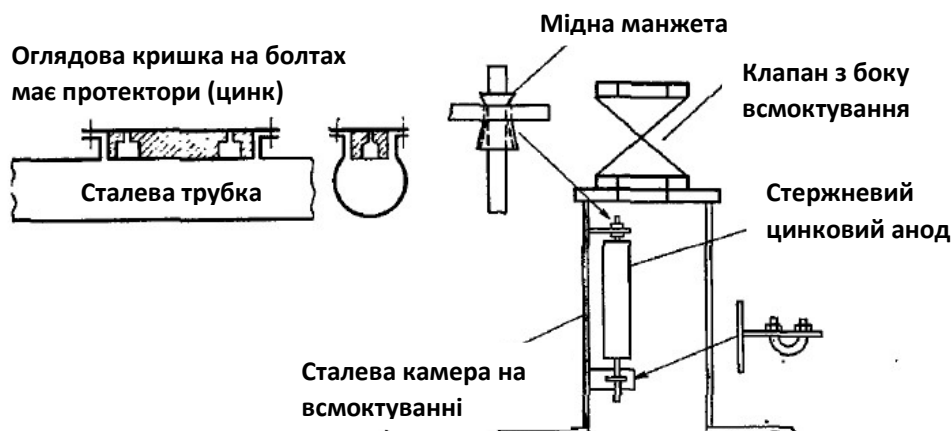


10. Глухі порожнини повинні бути по можливості зведені до мінімуму в конструкціях, розрахованих на безвідмовне функціонування, якщо ж такі порожнини не підлягають ремонту, слід передбачити додатковий запас міцності, щоб запобігти загрозі корозійної втоми.



### 9.3. Попередження корозії та захист від неї

1. Періодична заміна захисних елементів систем катодного захисту повинна бути легкою і простою [20].



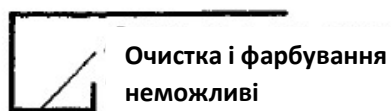
2. Краща технологія захисту та, яку можна економічно та багаторазово відтворювати в практичних умовах.

3. При необхідності застосування піскоструминного очищення в процесі обслуговування повинні бути передбачені додаткові пристрої або специфічні способи захисту від доступу абразиву.



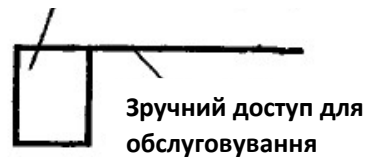
4. Місцеві і загальні геометричні форми об'єкта повинні забезпечувати проведення повторних заходів попередження корозії і захисту від неї [32, 33].





Невдалий варіант

Повністю герметизовано, не вимагає обслуговування



Більш вдалий варіант

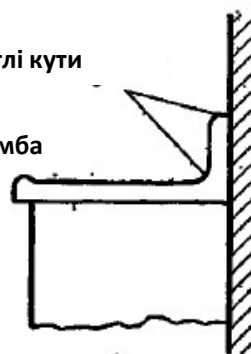
Неокруглі кути  
важко очищати  
Кришка  
завантажувального  
люка



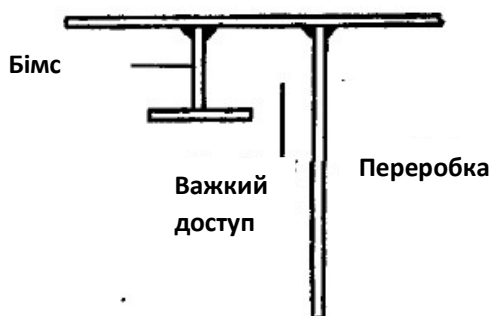
Невдалий варіант

Округлі кути

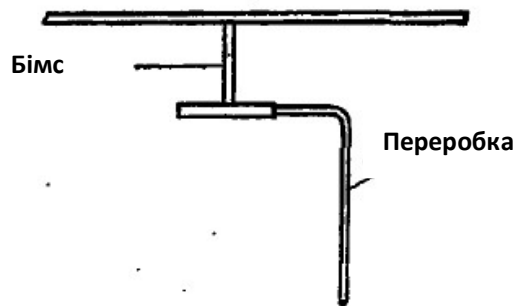
Тумба



Більш вдалий варіант



Невдалий варіант

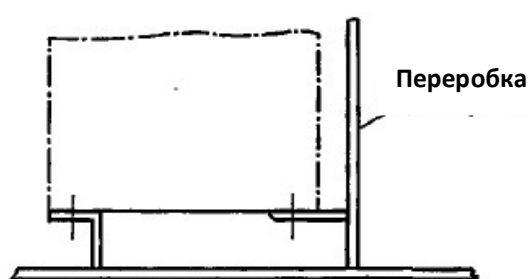


Більш вдалий варіант



Опора

Невдалий варіант



Більш вдалий варіант

## РОЗДІЛ 10. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТИКОРОЗІЙНИХ ЗАХОДІВ

### 10.1. Оцінка економічної ефективності антикорозійних заходів при проектуванні

При розробленні та критичному оцінюванні проектів по захисту від корозії, ймовірно, найбільш важливим питанням для адміністрації є їх вартість. Корозія відноситься в основному до економічних проблем, оскільки пов'язана з втратами основних фондів і підприємницького прибутку. Захист від корозії повинен в першу чергу забезпечувати найбільш ефективні заходи щодо запобігання таким втратам, при цьому слід не забувати про техніку безпеки, забруднення навколишнього середовища і продукції, які тісно пов'язані з корозійними пошкодженнями.

Обґрунтовуючи своє рішення на реальній економічній оцінці, проектувальник може виділити найкращу комбінацію матеріалів, технології та методів захисту від корозії з запропонованого набору рішень, намагаючись відповісти на наступні питання [20]:

- а) Чи будуть додаткові витрати на захист від корозії економічно виправданими?
- б) Чи можна досягти більшої економії при існуючому рівні витрат шляхом більш раціонального розміщення капіталовкладень?
- в) Допустима деяка ступінь корозії або слід витратити додаткові кошти на захист?
- г) Які необхідні додаткові витрати на захист, щоб передбачити заходи безпеки і збереження довкілля [38]?

## **10.2.Рекомендації з оцінки економічної ефективності антикорозійних заходів**

1. При економічній оцінці захисту від корозії на стадії проектування по можливості необхідно враховувати всі елементи витрат [20, 39]:

а) Прямі витрати, до яких належать витрати на живу працю, безпосередньо витрачена на виробництво продукту (початкові роботи, роботи з обслуговування і заміни устаткування);основні виробничі матеріали (для основного будівництва, а також використовувані при поточних і капітальних ремонтах);перепроєктування (часткове);договори з субпідрядником (включаючи процеси обробки на підприємствах);знос і заходи щодо його запобігання;витрати на представництво і на транспортування (наприклад, портові збори і т. д.);укладення трудових контрактів; послуги консультантів;аналізи і випробування, включаючи проведення операцій неруйнівного контролю;лабораторні дослідження.

б) Непрямі витрати, до яких належать витрати на живу працю, входять у вартість продукту непрямым чином;

- допоміжні виробничі матеріали і поставки (прийом, контроль, зберігання, доставка, догляд і т. д.);
- перепроєктування (часткове)
- затримки;
- техніку безпеки та страхування;
- простої;
- втрати через зменшення продуктивності;
- втрати продукту;
- забруднення навколишнього середовища;
- забруднення і очищення продукту від забруднення;
- втрати при перевезенні вантажу і перевантаження (через руйнування покриттів і іржавіння);

- втрати при перевезенні вантажу і перевантаження в критичних умовах;
- збитки або прибуток, пов'язані з перерозподілом витрат часу (понад швидке випорожнення цистерн з нержавіючої сталі);
- втрати внаслідок можливого катастрофічного руйнування;
- втрати від можливих пожеж;

в) Накладні витрати, до яких належать (пропорційно) [20, 39]:

- загальні та адміністративні (маркетинг, заробітна плата адміністрації, корпоративні витрати);
- орендна плата за машини і обладнання;
- амортизація машин, обладнання та споруд;
- додаткові виплати (пенсії, оплачувані відпустки, хвороби і свята);
- страхування;
- податки, субсидії (на удосконалення);
- опалення та освітлення;
- послуги;
- експлуатаційні витрати; поточний ремонт та обслуговування;
- дослідження і розробки; постачання лабораторій і постійні витрати.

г) Прибуток або збиток:

- виплата відсотків по позиках;
- відсоток на капітал (повернення на вкладення);
- доходи від відновлення майна і ліквідаційна вартість;
- можливість інфляції.

2. Чітко складені і ясні технічні умови необхідні для правильної економічної оцінки заходів щодо захисту від корозії. Проектувальник повинен точно знати, що йому вимагати від виробника, збирача, монтажника і експлуатаційника, щоб правильно оцінити всю роботу. Проектувальник не в змозі врахувати всі подробиці, які можуть бути важливі покупцеві, якщо вони не наведені в контракті, інструкціях,

технічних умовах і кресленнях. Стандартизовані операції повинні бути вказані посиланнями на відповідні нормалі [20, 39].

3. У тих випадках, коли точних інструкцій і технічних умов немає, підрядник поставляє ті матеріали, які для нього найбільш економічно вигідні. Такі матеріали в багатьох випадках можуть не відповідати вимогам захисту від корозії, а всякий попередній економічний аналіз може виявитися ненадійним. Для повної ж економічної оцінки необхідні:

а) точний опис роботи, що має і що не повинно бути зроблено, де повинна бути виконана робота;

б) виключення з ужитку загальних (описових) термінів в інструкціях, інструкції повинні відповідати стандартам або повинні бути складені з використанням точних технічних термінів і зрозумілих позначень;

в) точний опис методів виконання робіт та застосування продукції, що виготовляється, опис обладнання та інструментів;

г) точні специфікації систем захисту від корозії і умов їх застосування;

д) вимоги техніки безпеки і опис допоміжного обладнання;

е) зрозумілі і докладні описи умов зберігання, руху матеріалів і готової продукції, обслуговування, кваліфікації робітників, погодних обмежень, динаміки виробництва та збирання, спеціальних інструментів, для яких повинні бути вказані торгові марки і номери, витрат по найму і т.п.

4. Поряд з вирішенням проблем, пов'язаних зі збільшенням ціни виробництва і обсягу капіталовкладень, головним завданням економічного аналізу при проектуванні є зниження витрат і збільшення прибутку. Оскільки економіка є суспільною наукою, а конструювання – прикладною, то економічна оцінка заходів захисту від корозії служить мостом між цими

науками, дозволяючи отримати вартісну оцінку проектів захисту і встановити розумні межі інженерних рішень.

5. Кожен непродуктивний знос основних і оборотних фондів внаслідок корозії повинен бути визнаний збитком для національної економіки, втратою живої і матеріалізованої праці, які в протилежному випадку могли б бути використані для продуктивної мети.

6. Від витрат на захист залежить економічний ефект останньої. Тому при проектуванні необхідно збалансувати збиток від корозії (включаючи прямі і непрямі втрати) з усією гамою витрат на захист. При проектуванні захисту не слід надавати перевагу більш дорогим (ніж це абсолютно необхідно) матеріалам і продуктам якщо це тільки не є більш економічно вигідно в перспективі, необхідно в цілях безпеки персоналу або з інших важливих причин.

7. Іноді поступова заміна зношених елементів конструкцій і устаткування економічно більш вигідна, ніж заходи щодо запобігання корозії, які вимагають високих початкових і експлуатаційних витрат. Тому необхідно оцінити витрати на поточний і капітальний ремонт. Згодом кородуючі елементи можна замінити новими, що були у використанні або кращими матеріалами і деталями; в проекті це повинно бути відповідно передбачено.

8. Щоб поліпшити експлуатаційні властивості конструкцій і обладнання, схильних до корозії, слід звернути увагу на що впливають такі довгострокові фактори [20, 39]:

- а) фондоозброєність;
- б) рівень технології;
- в) кваліфікацію робочої сили в залежності від освіти, досвіду та мотивації;
- г) організацію робіт.

9. В основі правильної економічної оцінки і прийняття рішень щодо заходів по захисту від корозії лежить достовірне уявлення про динаміку цін та ефективності застосування і використання матеріалів систем захисту, технологічних процесів і персоналу. Це необхідно враховувати для кожного елемента проекту, маючи на увазі весь проект.

10. Необхідно вивчити динаміку корозійних руйнувань, причини їх виникнення та попередні витрати, пов'язані з корозією [20, 39].

11. Необхідно класифікувати ефективність раніше проведених протикорозійних заходів, з'ясувати, чи застосовувалися вони до тих корозійних явищ що постійно виявлялися або до періодичних (наприклад, сезонним), тобто встановити, яким процесом, динамічним або статичним, є корозія.

12. Необхідно ретельно вивчити зафіксовані в документах відомості про корозійну поведінку матеріалів, споруд і конструкцій, а також методи протикорозійного захисту. Стійкість матеріалів конструкцій і систем запобігання корозії може значно змінюватися в залежності від існуючих корозійних умов.

13. Для економічної оцінки при наявності значного числа випадків корозії постійного і щодо повторюваного характеру рекомендується проводити обробку даних на ЕОМ і складати періодичні аналітичні зведення.

14. Корозійні руйнування, особливо пов'язані з ушкодженнями в результаті корозії під напругою, корозійної втоми і інші, часто, помилково класифікують за вартістю механічних руйнувань.

15. У кожному проекті повинні бути приведені розрахунки і оцінка терміну служби для повторного застосування об'єкта і т. д.

16. Терміни служби споруд і устаткування можна оцінити лише наближено шляхом усереднення наявних статистичних даних, однак обчислені терміни служби далеко не завжди збігаються з фактичними.

17. Навіть якщо термін служби матеріалів відповідає зареєстрованому в процесі корозійних випробувань, рішення про їх застосування необхідно приймати з урахуванням вартісних показників (первинних капіталовкладень, амортизації, технічного обслуговування і поточного ремонту, експлуатаційних витрат, втрат за рахунок простоїв і т. п.).

18. Інформація про терміни служби окремих матеріалів повинна базуватися на наступних даних:

а) середньостатистичному терміну виходу матеріалу з ладу в даному середовищі і в даному місці при середній швидкості корозії;

б) критичної товщині або міцності матеріалів, що дозволяє зберігати цілісність споруд або обладнання;

в) терміни заміни зношених матеріалів в даних умовах для різних елементів конструкцій і вузлів;

г) призначення матеріалів для різних елементів конструкцій і вузлів шляхом логічного їх розподілу на підрозділи по схильності різних видів корозії;

д) заміни матеріалів при ремонті конструкцій і вузлів;

е) можливі виходи з ладу під дією корозії.

19. При розрахунку терміну служби об'єкта повинна враховуватися корозія як внутрішніх, так і зовнішніх поверхонь, виражена через швидкість корозії.

20. Для порівняльної оцінки різних технологічних рішень конкретної корозійної проблеми результати окремих розрахунків повинні бути



приведені до одного показника, тобто витрат за день, рік, весь термін служби і т. п.

21. Вибір конструкції, системи або методу, які забезпечать найбільше зниження загальних експлуатаційних витрат і необхідну безпеку, є початковим застосуванням економіки корозії в проектах, що включають захист від корозії.

22. Для економічної оцінки протикорозійних заходів необхідно, виходячи з даних за попередній період, шляхом екстраполяції будувати криві для прогнозування.

23. Вибір матеріалу для лакофарбового покриття не слід відштовхуватись від на середньорічної швидкості корозії сталі. Основне значення має термін служби лакофарбового покриття при експлуатації в агресивних середовищах і можливість появи і поширення на ньому іржі.

24. З економічних міркувань найбільш ефективні системи лакофарбових покриттів слід наносити на поверхні, найбільш схильні до агресивних дій, а менш дорогі системи – на поверхні, що знаходяться в більш сприятливих умовах.

25. При економічній оцінці лакофарбових покриттів ціна матеріалів не є визначальним показником: необхідно враховувати витрати на оплату робочої сили (приблизно 80%), додаткові витрати (на спорудження підмостків, вентиляцію, сушку, освітлення і очищення, на приміщення і транспорт).

26. Для економічної оцінки покриттів інструкції постачальників лакофарбових матеріалів по витраті останніх на одиницю поверхні вважаються орієнтовними. Реальною базою для оцінки є справжня величина площі поверхні, яка визначається текстурою, хвилястістю, наявністю деталей і т. д.

27. Для відповідної оцінки конкретної системи лакофарбових покриттів найбільш важливим показником є витрати на підтримку її в працездатному стані (в розрахунку на квадратний метр в рік). Цей показник необхідно розглядати в поєднанні з показниками експлуатаційної надійності покриття в умовах, що змінюються (наприклад, при зміні вантажу судна).

28. Сучасна система оподаткування в більшості випадків не сприяє впровадженню ефективних заходів щодо попередження корозії. Одноразове зменшення доходу, що оподатковується, менше витрат на заходи щодо попередження корозії, які відшкодовуються протягом тривалого терміну по частинах в формі амортизації. З точки зору національної економіки доцільно стимулювати впровадження протикорозійних заходів шляхом податкових пільг.

### **10.3.Методи оцінки економічної ефективності антикорозійних заходів**

Вибравши загальне технічне рішення проблеми захисту від корозії, фахівець з корозії повинен довести керівництву, що дане рішення економічно ефективно, тобто забезпечує збільшення прибутку. Розглядаючи економічний аспект вибору варіантів захисту, він стикається в основному з трьома можливими типами рішення [20, 39].

1. Вибір оптимального варіанту захисту шляхом застосування нового процесу або проекту, який не пройшов контрольні випробування. В даному випадку варіант захисту оцінити в вартісній формі надзвичайно важко, а іноді й неможливо.

2. Чітко розроблене рішення, згідно з яким витрати на варіант А менше, ніж на варіант Б, але обидва варіанти забезпечують однакові передбачувані терміни служби, або витрати на здійснення обох варіантів

однакові, але один забезпечує більший термін служби, ніж інший (зазвичай обидва терміну служби менше року).

3. Порівняння двох варіантів з різними витратами і різними термінами служби. У таких випадках необхідно оцінювати не тільки витрати на новий проект захисту, але і витрати по підтримці захисту протягом економічно виправданого строку служби захищаються основних фондів.

При систематичному аналізі варіантів захисту від корозії найчастіше доводиться мати справу з останнім типом зіставлення економічних показників. В даний час розроблено декілька різних методик розрахунків, які використовуються при економічній оцінці систем захисту від корозії:

а) порівняння грошових витрат для систем короткостроковій захисту;

б) порівняння термінів служби систем захисту без урахування витрат на їх здійснення та виробничих витрат;

в) порівняння термінів окупності протикорозійних заходів, виділених на річний дохід (або економію) (податки і інфляція до уваги не беруться);

г) порівняння прибутків на вкладений капітал. Ця методика обернена до попередньої – результати можна порівнювати у відсотках;

д) порівняння щорічних витрат. Для порівняння варіантів протикорозійних заходів, що забезпечують різний термін служби, або для порівняння варіанту, що вимагає великих одноразових витрат, з іншим варіантом, що вимагає багаторазових витрат, витрати збільшуються на коефіцієнт відшкодування капіталу.

## РОЗДІЛ 11. РОЗРАХУНОК КАТОДНОГО ЗАХИСТУ ТРУБОПРОВОДІВ

Розрахунок виконується з ціллю визначення типу і числа станцій катодного захисту, а також характеристик анодного заземлення (число електродів, марка дренажного проводу і його днища) [20-23].

### 11.1. Початкові дані

Вихідними даними для розрахунку є середній питомий електроопір ґрунту уздовж траси трубопроводу, перехідний опір «трубопровід–ґрунт», величини опору одиниці для трубної сталі і ізоляції, геометричні розміри трубопроводу та ізоляції, що визначають величину вхідного опору ізольованого трубопроводу.

#### 11.1.1. Питомий електроопір ґрунту

У практичних умовах величина питомого електроопору ґрунту визначається за допомогою чотириелектродної установки. Величина середнього питомого електроопору ґрунту обраховується за формулою:

$$\rho_r = \sum_{i=1}^n \rho_{r_i} \frac{L_i}{L} \quad (11.1)$$

де  $\rho_{r_i}$  – питомий електроопір ґрунту на ділянці довжиною  $L_i$ ;

$\frac{L_i}{L}$  – доля ділянки довжиною  $L_i$  в загальній протяжності трубопроводу  $L$ .

Якщо результати безпосереднього вимірювання відсутні, то тоді визначають середній електроопір ґрунту можна тільки наближено, так як його величина залежить не тільки від типу ґрунту, але й від вологості, гранулометричного складу, складу солей і т.п. Межі змін для різних ґрунтів показані в табл. 11.1 [20-23].

Таблиця 11.1 Величина питомого електроопору ґрунтів, Ом·м

Вид ґрунту	При атмосферних осадках, мм/рік	
	до 250	до 500
Чорнозем	20÷50	2÷10
Глина	10÷100	5÷20
Пісок	1000	3÷300
Вапняк пористий	1000	3÷300
Ґравій	1000	100÷1000

### Задача 1

Визначити середній питомий електроопір ґрунту уздовж траси магістрального трубопроводу, якщо відомо, що на частки ґрунтів з  $\rho_{\Gamma} = 170$  Ом·м припадає 10% траси, з  $\rho_{\Gamma} = 80$  Ом·м – 10%, з  $\rho_{\Gamma} = 70$  Ом·м – 20%, з  $\rho_{\Gamma} = 40$  Ом·м – 10%, з  $\rho_{\Gamma} = 20$  Ом·м – 20% і з  $\rho_{\Gamma} = 10$  Ом·м – 30% протяжності трубопроводу.

#### Розв'язання

За формулою  $\rho_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n \rho_{\Gamma i} \cdot \frac{L_i}{L}$  знаходимо питомий електричний опір ґрунту.

$$\rho_{\Gamma} = 170 \cdot 0,1 + 80 \cdot 0,1 + 70 \cdot 0,2 + 40 \cdot 0,1 + 20 \cdot 0,2 + 10 \cdot 0,3 = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

### 11.1.2. Поздовжній опір трубопроводу

Поздовжній опір трубопроводу розраховують за формулою [20-23]:

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi \cdot \delta \cdot (D - \delta)} \quad (11.2)$$

де  $\rho_T$  – питомий електроопір трубної сталі, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $D, \delta$  – зовнішній діаметр трубопроводу і товщина стінки.

Величина  $\rho_T$  сталей, застосованих в даний час в практиці трубопровідного будівництва, приведена в табл. 11.2.

Таблиця 11.2. Величина  $\rho_T$  різних марок сталі

Марка трубної сталі	$\rho_T$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
Г7ГС	0,247
І7І2ОФ	0,245
08Г2СФ	0,243
І8Г2	0,218
І8Г2САФ	0,266
І8ЧГ2САФ	0,260
З	0,218

Якщо марка сталі невідома, то величину  $\rho_T$  слід застосовувати рівною 0,245 Ом·мм<sup>2</sup>/м.

## Задача 2

В результаті технологічного розрахунку встановлено, що для забезпечення перекачування 46 млн.т/рік нафти найбільш економічно доцільним є діаметр трубопроводу  $D = 1020$  мм з товщиною стінки  $\delta$  10 мм, виготовленої зі сталі 17ГС.

### Розв'язання

Питомий електроопір сталі 17ГС становить  $\rho_T = 0,247$  Ом·мм<sup>2</sup>/м. Повздовжній опір трубопроводу розраховуємо за формулою (11.2):

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi \cdot \delta \cdot (D - \delta)}$$

$$R_T = \frac{0,274}{3,14 \cdot 10 \cdot (1020 - 10)} = 7,79 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

### 11.1.3. Перехідний опір «Трубопровід–грунт»

Величина перехідного опору «трубопровід–грунт»  $R_{\Pi}$  характеризує якість ізоляційного покриття. На практиці її визначають методом катодної поляризації ділянки трубопроводу. При цьому величину  $R_{\Pi}$  розраховують за формулою [20-23]

$$R_{\pi} = \frac{\pi D R_{\tau} x^2}{\left( \ln \frac{U_1}{U_2} \right)^2}, \quad (11.3)$$

де  $x$  – відстань між осями трубопроводу, в яких виміряні величини потенціалу  $U_1, U_2$ .

Дослід показує, що з потоком часу якість ізоляційного покриття трубопроводів погіршується. При чому зміна величини перехідного опору відбувається за експоненціальним законом

$$R_{\pi}(\tau) = R_{\pi\pi} \cdot e^{-\beta\tau}, \quad (11.4)$$

де  $R_{\pi\pi}, R_{\pi}(\tau)$  – величини перехідного опору на початку експлуатації і на момент часу  $\tau$ ;  $\beta$  – показник швидкості старіння, 1/рік.

Величина коефіцієнта  $\beta$  коливається в межах від 0,118 до 0,133 1/рік. Для орієнтованих розрахунків можна прийняти  $\beta = 0,125$  1/рік, а  $R_{\pi\pi} = 10^4$  Ом.м<sup>2</sup> – для ізоляційних покриттів із полімерних липких стрічок. Методом катодної поляризації можна визначити величини перехідного опору  $R_{\pi}(\tau_1)$  і  $R_{\pi}(\tau_2)$  на момент часу  $\tau_1$  і  $\tau_2$ . Тоді фактична величина показника швидкості старіння для даного трубопроводу складає

$$\beta = \frac{1}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln \frac{R_{\pi}(\tau_1)}{R_{\pi}(\tau_2)}. \quad (11.5)$$

Інтегруючи рівняння (11.4), отримаємо формулу для розрахунку середнього перехідного опору за нормативний термін служби  $\tau_{\text{нс}}$  установок катодного захисту:

$$R_{\pi.\text{ср}} = \frac{R_{\pi\pi}}{\beta\tau_{\text{нс}}} \cdot (1 - e^{-\beta\tau_{\text{нс}}}). \quad (11.6)$$

Термін служби установок визначається за формулою

$$\tau_{\text{нс}} = \frac{1}{\xi_{\text{AM}}}, \quad (11.7)$$

У випадку, коли термін введення станцій катодного захисту в експлуатацію не співпадає з закінченням будівництва лінійної частини

трубопроводу, для описання зміни величини перехідного опору в часі використовуючи залежність [20-23]

$$R_{\Pi}(\tau) = R_{\Pi\kappa} \cdot \left(\frac{R_{\Pi\Pi}}{R_{\Pi\kappa}}\right)^{\frac{T_c}{T_c + \tau}}, \quad (11.8)$$

де  $R_{\Pi\kappa}$  – кінетичний перехідний опір «трубопровода–грунт», який визначається із трансцендентного рівняння

$$R_{\Pi\kappa} - \frac{\rho_r}{2\pi} \ln R_{\Pi\kappa} = \frac{\rho_r}{\pi} \ln \frac{1,12}{\sqrt{R_T D H}}, \quad (11.9)$$

де  $H$  – глибина закладення осі трубопроводу;  $T_c$  – постійна часу старіння ізоляційного покриття.

Орієнтовані значення постійної часу старіння для різних типів ґрунтів і конструкцій ізоляційного покриття приведені в таблиці 3.

Таблиця 11.3. Орієнтовані величини  $T_c$ , рік

Конструкція ізоляційного покриття	Межі зміни постійної часу старіння для ґрунтів		
	солончак	пісочно-глиняний	
	$\rho_r = 1 \div 10$ Ом. м	$\rho_r = 10 \div 20$ Ом. м	$\rho_r = 20 \div 200$ Ом. м
Бітумне:			
нормальне ( $\delta = 4$ мм)	4–8	8–16	16–30
посилене ( $\delta = 6$ мм)	8–16	12–20	20–40
Полімерне плівкове:			
одношарове	6–12	12–25	25–45
двошарове	10–20	20–40	40–50

При наявності експериментально визначених значень  $R_{\Pi}(\tau_1)$  і  $R_{\Pi}(\tau_2)$  постійну часу старіння ізоляційного покриття даного трубопроводу можна визначити за формулами:

$$T_c = \tau \cdot \frac{\ln \frac{R_{\Pi}(\tau)}{R_{\Pi\kappa}}}{\ln \frac{R_{\Pi\Pi}}{R_{\Pi}(\tau)}}, \quad (11.8')$$



$$T_c = \frac{\tau_2 \ln \frac{R_{\Pi}(\tau_2)}{R_{\Pi K}} - \tau_1 \ln \frac{R_{\Pi}(\tau_1)}{R_{\Pi K}}}{\ln \frac{R_{\Pi}(\tau_1)}{R_{\Pi}(\tau_2)}}, \quad (11.9')$$

Формулою (11.8') необхідно користуватися, коли величина початкового перехідного опору відома, а формулою (11.9'), коли величина  $R_{\Pi\Pi}$  невідома [20-23].

### Задача №3

Обчислити величини перехідного опору « трубопровід–грунт » до кінця нормативного терміну служби ізоляційного покриття на основі полімерних липких стрічок і в середньому за цей термін, якщо в кінці другого і п'ятого років експлуатації покриття виміряні величини перехідного опору становили відповідно 15576 и 10705 Ом·м<sup>2</sup>.

#### Розв'язання

1. Розраховуємо величину показника швидкості старіння покриття за формулою:

$$\beta = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \times \ln \frac{R_{\Pi}(\tau_1)}{R_{\Pi}(\tau_2)} = \frac{1}{5 - 2} \times \ln \frac{15576}{10705} = 0,125 \frac{1}{\text{рік}}$$

де  $R_{\Pi}(\tau_1)$ ,  $R_{\Pi}(\tau_2)$  – величини перехідного опору на моменти часу  $\tau_1$  та  $\tau_2$ , відповідно, Ом·м<sup>2</sup>.

2. Тривалість нормативного терміну служби ізоляції визначаємо за формулою:

$$\tau_{\text{нт}} = \frac{1}{\xi_{\text{AM}}} = \frac{1}{0,105} = 9,5 \text{ років}$$

де  $\xi_{\text{AM}}$  – норматив амортизаційних відрахувань по установкам катодного захисту, 1/рік.

3. Величина перехідного опору – на початку експлуатації за формулою:

$$R_{\Pi}(\tau) = R_{\Pi\Pi} \times e^{-\beta\tau} = 15576 \times e^{0,125 \times 2} = 20\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

- у кінці нормативного терміну служби за формулою (3.3):

$$R_{\Pi}(\tau_{\Pi T}) = 20\,000 \times e^{-0,125 \times 9,5} = 6099,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

- у середньому за нормативний термін служби за формулою:

$$R_{\Pi.ср} = \frac{R_{\Pi\Pi}}{\beta \times \tau_{\Pi T}} \times (1 - e^{-\beta \tau_{\Pi T}}) = \frac{20\,000}{0,125 \times 9,5} \times (1 - e^{-0,125 \times 9,5}) = 11\,705,6 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

де  $R_{\Pi\Pi}$ ,  $R_{\Pi}(\tau)$  – величини перехідного опору на початку експлуатації та на момент часу  $\tau$ , Ом·м<sup>2</sup>.

#### 11.1.4. Вхідний опір ізольованого трубопроводу

Величина вхідного опору  $Z$  використовується при розрахунку зони дії станції катодного захисту (СКЗ), сили дренажного струму. В свою чергу вона знаходиться в залежності від повздовжнього опору трубопроводу  $R_T$  і опір одиниці довжини ізоляції  $R_{i3}$ :

$$R_{i3} = \frac{R_{\Pi}}{\pi D}. \quad (11.10)$$

Середнє значення вхідного опору трубопроводу за нормативний термін експлуатації катодної установки складає

$$Z_{ср} = 0,5 \cdot \sqrt{R_T \cdot R_{i3.ср}}, \quad (11.11)$$

а величина вхідного опору до кінця нормативного терміну

$$Z_k = 0,5 \cdot \sqrt{R_T \cdot R_{i3}(\tau_{HC})}, \quad (11.12)$$

де  $R_{i3.ср}$ ,  $R_{i3}(\tau_{HC})$  – опір ізоляційного покриття, розраховані за формулою (11.10) по величинам перехідного опору відповідно середнього на момент часу  $\tau_{HC}$ .

### 11.1.5. Стала розподілення потенціалів і струмів вздовж трубопроводу, який захищається.

Величина сталої розподілення  $\alpha$  характеризує інтенсивність зміни прикладеної різниці потенціалів в струмів по довжині трубопроводу, який захищаємо. Вона залежить від співвідношення опору ізоляції і металу труб і розраховується за формулою [20-23]:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{iz}(\tau_{nc})}}, \quad (11.13)$$

тобто, для найгіршого випадку.

#### Задача 4

Визначити величину вхідного опору ізольованого трубопроводу діаметром  $D = 1020$  мм до кінця і в середньому за нормативний термін служби, якщо поздовжній опір трубопроводу становить  $R_T = 7,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Розрахувати постійну розподілу струмів і потенціалів уздовж захищається трубопроводу. Перехідний опір в кінці експлуатації  $R_{п.кін.} = 6099,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , в середньому за термін експлуатації  $R_{п.сер.} = 11705,6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

#### Розв'язання

Знаходимо опір одиниці довжини ізоляції середнє і наприкінці терміну експлуатації:

$$R_{зн.} = \frac{R_{п}}{\pi \cdot D}$$

$$R_{зн.сер} = \frac{11705,6}{3,14 \cdot 1,02} = 3652,9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$R_{зн.кін.} = \frac{6099,7}{3,14 \cdot 1,02} = 1903,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Знаходимо величини вхідного опору середнє і в кінці терміну експлуатації:

$$z_i = 0,5 \cdot \sqrt{R_T \cdot R_i}$$

$$z_{cp} = 0,5 \cdot \sqrt{7,7 \cdot 10^{-6} \cdot 3652,9} = 8,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$$

$$z_k = 0,5 \cdot \sqrt{7,7 \cdot 10^{-6} \cdot 1903,5} = 6,1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$$

Визначаємо постійну розподілення струмів і потенціалів:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{3H.kin.}}}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{7,7 \cdot 10^{-6}}{1903,5}} = 63,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м.}$$

#### 11.1.6. Розрахункові значення потенціалів

При розрахунку катодного захисту підземних металічних споруджень розрізняють три значення потенціалу [20-23]:

- 1) природній або стаціонарний потенціал  $E_{ECT}$ , тобто той, який існує до включення захисту;
- 2) прикладений або розрахований потенціал  $E_{min(max)}$ , додатково прикладений на споруду в результаті дії захисту;
- 3) захисний або загальний потенціал  $E_{зах.min(max)}$ , споруди, тобто той, що встановився після підключення захисту.

За вищенаведеним визначенням потенціали зв'язані між собою виразом

$$E_{min(max)} = E_{зах.min(max)} - E_{ECT}. \quad (11.14)$$

Величини потенціалів при захисті підземних металевих споруд від корозії вимірюють по відношенні до мідно-сульфатного електроду порівняння (МСЕ). Численними вимірюваннями встановлено, що величина природного потенціалу підземних металевих споруд коливається в інтервалі від  $-0,23$  до  $-0,72$  В, причому практичний діапазон зміни  $E_{ECT}$  складає від  $-0,45$  до  $-0,60$  В. Тому, якщо не маємо точних даних про величину природного потенціалу сталі в даному ґрунті, прийнято вважати

$E_{\text{ЕСТ}} = -0,55 \text{ В}$  ( по МСЕ). Нормативними документами [1] встановлено наступні значення захисного потенціалу.

Таблиця 11.4. Мінімальні захисні потенціали, В

Метал споруди	Захисне покриття	Водневий електрод порівняння	Мідно-сульфатний електрод порівняння	Середовище
Сталь	Є нема	-0,8 Не обмежується	-1,1 Не обмежується	Будь-яка
Свинець	є нема	-0,8 -1,0	-1,1 -1,3	Кисле Лужне
Алюміній	частково пошкоджено	-1,08	-1,38	Будь-яка

Звідси, користуючись формулою (11.14), легко отримати граничні значення прикладеного потенціалу. Наприклад, для сталевого ізоляційного трубопроводу

$$E_{\text{max}} = -1,1 - (-0,55) = -0,55 \text{ В.}$$

$$E_{\text{min}} = -0,85 - (-0,55) = -0,30 \text{ В.}$$

У подальших розрахунках знак «мінус» перед величиною потенціалу будемо опускати, але він мається на увазі.

## 11.2. Розрахункові залежності для розподілення прикладеної різниці потенціалів і струму захисту вздовж трубопроводу

### 11.2.1. Загальні відомості

Незалежно від кількості підключених до трубопроводу СКЗ і його протяжності рівняння, що описують закономірності зміни струмів і потенціалів по довжині трубопроводу, мають наступний вигляд [20-23]:

$$I(x) = C_1 e^{\alpha x} + C_2 e^{-\alpha x} - \frac{I_{\text{max}} \rho_r}{\pi R_{\text{із}}} \cdot \text{Arsh} \frac{x}{y} \quad (11.15)$$

$$E(x) = C_3 e^{\alpha x} + C_4 e^{-\alpha x} + \frac{I_{\text{max}} \rho_r}{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (11.16)$$

де  $C_1 + C_4$  – стала інтегрування, що визначаються з відповідних граничних умов;  $x$  – віддалення перерізу трубопроводу від точки дренажу (місце підключення СКЗ);  $I_{\max}$  – сила струму в точці дренажу;  $y$  – віддалення анодного заземлення від трубопроводу.

Рівняння (11.15), (11.16) отримані при наступних допущеннях:

1) ґрунт є однорідним; 2) трубопровід зроблений із труб одного і того ж діаметру з однаковою товщиною стінки; 3) матеріал ізоляції володіє незмінними по довжині діелектричними властивостями, а сама вона – без дефектів, однакової товщини.

Окремим випадком рівнянь (11.15), (11.16) є залежності для  $I(x)$ ,  $E(x)$ , що отримані при катодному захисті трубопроводів кінцевої і «безкінечної» довжини одної або декількох СКЗ [20-23].

### 11.2.2. Станція катодного захисту «нескінченної» довжини

Для станції катодного захисту «безкінченної» довжини, коли до трубопроводу підключена СКЗ, при  $x \rightarrow \infty$  величина прикладеного потенціалу наближається до нуля, тобто  $E(x) \rightarrow 0$ . Визначені для цих умов сталі інтегрування дорівнюють [20-23]

$$C_1 = C_3 = 0; C_2 = I(x); C_4 = E_{\max} - \frac{I_{\max} \cdot \rho_r}{\pi \cdot y} \quad (11.17)$$

З урахуванням (11.17) формули (11.15), (11.16) приймуть вигляд

$$I(x) = I_{\max} \left( e^{-\alpha x} - \frac{\rho_r}{\pi R_{i3}} \cdot \operatorname{Arsh} \frac{x}{y} \right)$$

$$E(x) = \frac{E_{\max}}{1 + \theta} \left( e^{-\alpha x} + \frac{y \cdot \theta}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right), \quad (11.18)$$

$$\text{де } I_{\max} = \frac{E_{\max}}{2z + \frac{\rho_r}{\pi y}}; \theta = \frac{\rho_r}{2\pi z y} \quad (11.19)$$

### Задача 5

До ізолюваного сталевого трубопроводу підключена станція катодного захисту. Визначити, якою має бути накладена різниця потенціалів в точці дренажу, щоб забезпечити довжину плеча захисту  $x = 10$  км. Віддаленість анодного заземлення від трубопроводу становить  $y = 500$  м. Решта вихідні дані з прикладів 1 і 4.

#### Розв'язання

1. Захист трубопроводу від корозії забезпечується при величині накладки різниці потенціалів  $E(x) = E_{min} = -0,3$  В. Вирішуючи рівняння

(11.18) відносно  $E_{max}$ , отримаємо:

$$E_{max} = \frac{E_{min} \times (1 + \theta_k)}{e^{-\alpha x} + \frac{y \times \theta_k}{\sqrt{x^2 + y^2}}} = \frac{-0,3 \times (1 + 0,261)}{e^{-63,6 \times 10^{-6} \times 10000} + \frac{500 \times 0,261}{\sqrt{10000^2 + 500^2}}} = 0,7 \text{ В}$$

де

$$\theta_k = \frac{\rho_r}{2 \times \pi \times z_k} = \frac{50}{2 \times 3,14 \times 6,1 \times 10^{-2} \times 500} = 0,261$$

### 11.2.3. Катодний захист коротких трубопроводів

В даному випадку під коротким приймаються трубопроводи, на кінцях яких при підключенні СКЗ, що створює в точці дренажу потенціал  $E_{заш. max}$ , встановлюється величина захисного потенціалу не нижче мінімального, тобто  $E(x) \geq E_{заш. min}$ . Для визначення постійних інтегрування використовують наступні системи рівнянь:

$$\begin{cases} E_{др} = C_3 + C_4 + \frac{I_{max} \cdot \rho_r}{\pi \cdot y} \\ E_{min} = C_3 e^{\alpha x_m} + C_4 e^{-\alpha x_m} + \frac{I_{max} \rho_r}{\pi \sqrt{x_m^2 + y^2}} \end{cases} \quad (11.20)$$

$$\begin{cases} E_{max} = C_{31} + C_2 \\ E_{min} = R_{i3}(C_2 e^{-\alpha x_m} - C_1 e^{\alpha x_m} + \frac{l_{max} \rho_r}{\pi R_{i3} \sqrt{x_m^2 + y^2}} \end{cases} \quad (11.21)$$

де  $x_m$  – половина довжини трубопроводу.

Вирішуючи (11.20), (11.21) відносно  $C_1 \div C_4$  і підставляючи отримані вирази в (11.15), (11.16), отримаємо

$$I(x) = I_{max} \left\{ \frac{ch[\alpha(x_m - x)]}{ch(\alpha x_m)} + \frac{\rho_r sh(\alpha x)}{2\pi z \sqrt{x_m^2 + y^2} ch(\alpha x_m)} - \frac{\rho_r}{\pi R_{i3}} Arsh \frac{x}{y} \right\} \quad (11.22)$$

$$E(x) = \frac{\left( E_{др} - \frac{l_{max} \rho_r}{\pi y} \right) \cdot ip[\alpha(x_m - x)] + \left( E_{min} - \frac{l_{max} \rho_r}{\pi \sqrt{x_m^2 + y^2}} \right) sh(\alpha x)}{sh(\alpha x_m)} + \frac{l_{max} \rho_r}{\pi \sqrt{x^2 + y^2}} \quad (11.23)$$

де  $I_{max}$ ,  $E_{др}$  – величини струму і прикладеної різниці потенціалів в точці дренажу, рівні

$$I_{max} = \frac{E_{др} \cdot ch(\alpha x_m) - E_{min}}{2z [sh(\alpha x_m) + \frac{\rho_r}{2\pi zy} \cdot ch(\alpha x_m) - \frac{\rho_r}{2\pi z \sqrt{x_m^2 + y^2}}]} ; \quad (11.24)$$

$$E_{др} = E_{min} \left[ \frac{sh^2(\alpha x_m) + \frac{\rho_r}{2\pi zy} sh(\alpha x_m) ch(\alpha x_m) + 1}{ch(\alpha x_m)} \right] \quad (11.25)$$

Із формули (11.25), припускаючи  $E_{др} = E_{max}$ , можна визначить максимальну довжину плеча  $x_m = l_{max}/2$  однієї СКЗ.

### Задача 6

Використовуючи дані прикладів 1 і 4, визначити максимальну довжину трубопроводу  $L_{max}$ . Захистити який можна однією СКЗ, яка розташована посередині ділянки. Прийняти  $Y = 500$  м.

### Розв'язання

Використаємо формулу (11.25), приймаючи  $E_{др} = E_{max}$ ,  $x_m = \frac{L_{max}}{2}$  і зробимо перетворення до виду [20-23]:



$$\frac{E_{max}}{E_{min}} = \frac{sh^2\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right) + \frac{\rho}{2\pi zi} sh\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right) ch\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right) + 1}{ch\left(\alpha \frac{L_{max}}{2}\right)}$$

Ліва частина цього рівняння не залежить від величини  $L_{max}$  і складає  $\frac{0,55}{0,3} = 1,83$ . Необхідно підібрати таке величину  $L_{max}$ , при якій права частина рівняння також буде рівна 1,83. Підбір виконується в наступній послідовності.

1. Задаємо величину  $L_{max}$
2. Розраховуємо аргумент гіперболічних функцій і їх величину;
3. Знаходимо величину правої частини рівняння при  $L_{max}=10^4\text{м}$

$$\alpha \frac{L_{max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4}{2} = 0,318$$

$$sh(0,318) = 0,312; \quad ch(0,318) = 1,051$$

$$f(L_{max}) = \frac{0,321^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 500} \cdot 0,321 \cdot 1,051 + 1}{1,051} = 1,133$$

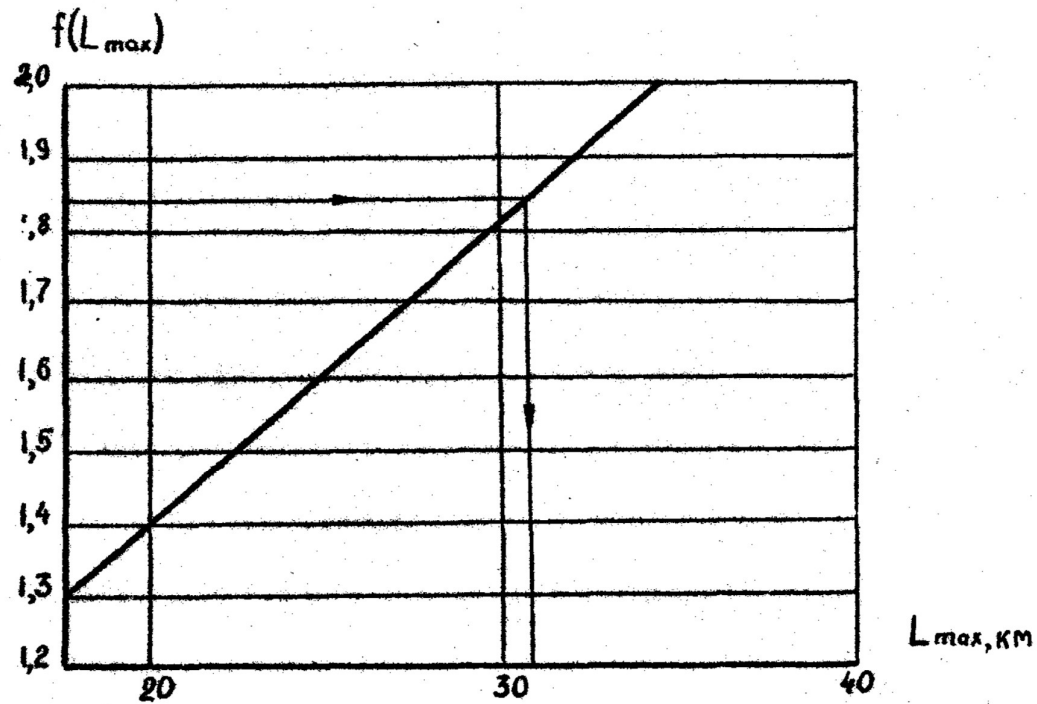


Рис.11.1. Графічне визначення максимальної протяжності трубопроводу, захист якого можливий з допомогою однієї СКЗ

При  $L_{\max} = 2 \cdot 10^4 \text{ м}$

$$\alpha \frac{L_{\max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4}{2} = 0,636$$

$$\text{sh}(0,636) = 0,679; \quad \text{ch}(0,636) = 1,209;$$

$$f(L_{\max}) = \frac{0,679^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 500} \cdot 0,679 \cdot 1,209 + 1}{1,209} = 1,386$$

При  $L_{\max} = 3 \cdot 10^4 \text{ м}$

$$\alpha \frac{L_{max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^4}{2} = 0,954$$

$$sh(0,954) = 1,107; \quad ch(0,954) = 1,492;$$

$$f(L_{max}) = \frac{1,107^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,06 \cdot 500} \cdot 1,107 \cdot 1,492 + 1}{1,492} = 1,780$$

При  $L_{max} = 3,5 \cdot 10^4 \text{ м}$

$$\alpha \frac{L_{max}}{2} = \frac{63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3,5 \cdot 10^4}{2} = 1,113$$

$$sh(1,113) = 1,360; \quad ch(1,113) = 1,687;$$

$$f(L_{max}) = \frac{1,360^2 + \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 500} \cdot 1,360 \cdot 1,687 + 1}{1,687} = 2,043$$

Результати розрахунку приведені на Рисунку 1, графічне рішення на якому дає  $L_{max} = 31,7 \text{ км}$ . При підключенні СКЗ на початку або в кінці ділянки трубопроводу максимальна довжина скоротиться у 2 рази і буде складати  $L_{max} = 15,85 \text{ км}$ .

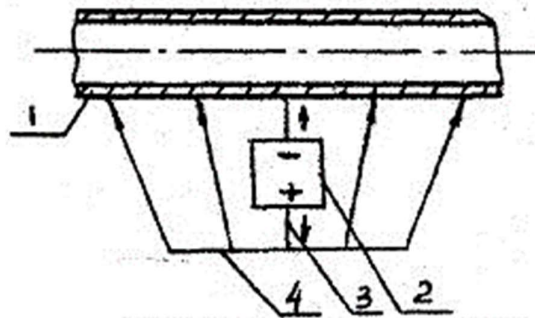


Рис. 11.2. Принципова схема катодного захисту: 1 – трубопровід; 2 – зовнішнє джерело постійного струму; 3 – з'єднувальний провід, 4 – анодне заземлення.

#### 11.2.4. Катодний захист магістрального трубопроводу

При достатній довжині трубопроводу його захист не може бути забезпечений однією СКЗ. Включення в роботу декількох катодних установок, віддалених одна від одної на відстань  $L$ , супроводжується їх

взаємовпливом. Для простоти вважають, що на розподіл накладеної різниці потенціалів К-ї СКЗ впливають тільки сполучені станції – (К-1)-а та (К+1)-а. В такому випадку розподіл прикладеної різниці потенціалів описується рівнянням [20-23]:

$$E(x) = E_{max} \frac{e^{-\alpha(l-x)} + e^{-\alpha x} + \theta \left[ \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} + \frac{1}{\sqrt{(l-x)^2+y^2}} \right]}{(1 + e^{-\alpha})(1 + \theta) + \theta \left[ \frac{1}{\sqrt{l^2+y^2}} - \frac{1}{y} e^{-\alpha l} \right]}. \quad (11.26)$$

Необхідну силу струму СКЗ для забезпечення захисту магістрального трубопроводу визначають за формулою:

$$l_{др} = \frac{E_{max}}{z(1 + 2e^{-\alpha l} + \theta)}. \quad (11.27)$$

За умовою трубопровід обслуговують однотипні СКЗ. Тому на середині відстані між ними в точці  $X=0,5L$  повинна виконуватись умова  $E(x) \geq E_{min}$ . Вирішуючи рівняння (26) для граничного випадку  $E(x) = E_{min}$  з урахуванням  $l \gg 2y$ , отримаємо вираз для визначення відстані між СКЗ:

$$l = \frac{2}{\alpha} \ln \left[ \frac{E_{max}}{K_{в} E_{min} (1 + \theta)} \right], \quad (11.28)$$

де  $K_{в}$  – коефіцієнт, що враховує вплив суміжної СКЗ:

$$K_{в} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left( \frac{E_{min}}{E_{max}} \right)^2 (1 + \theta)}}. \quad (11.29)$$

З рівняння (11.29) випливає, що величина  $K_{в}$  в загальному випадку не є постійною, а визначається величинами мінімальної і максимальної прикладеної різниці потенціалів, станом ізоляційного покриття, а також величиною граничного питомого електроопору ґрунту, в якому прокладен трубопровід. Загальне число СКЗ, необхідне для захисту трубопроводу довжиною  $L$ , складає:

$$N = \frac{L}{l}. \quad (11.30)$$

### Задача 7

Визначити число СКЗ і силу дренажного струму, необхідні для забезпечення катодного захисту магістрального трубопроводу довжиною  $L_T=850$  км і діаметром  $D = 1020$  мм. Решту даних взяти із задач 1 і 4.

#### Розв'язання

Розраховуємо:

1. Величину коефіцієнта  $\Theta$  вкінці нормативного строку служби ізоляції за формулою:

$$\theta = \frac{\rho_T}{2\pi \cdot z_k \cdot y} = \frac{50}{2 \cdot 3,14 \cdot 6,1 \cdot 10^{-2} \cdot 500} = 0,261.$$

2. Коефіцієнт, що враховує вплив сумісної СКЗ, за формулою:

$$K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{min}}{E_{max}}\right)^2 (1 + \theta)}} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,30}{0,55}\right)^2 \cdot (1 + 0,261)}} = 0,559.$$

3. Відстань між СКЗ за формулою:

$$L = \frac{2}{\alpha} \cdot \ln \left[ \frac{E_{max}}{K_B \cdot E_{min}(1 + \theta)} \right] =$$

$$= \frac{2}{63,6 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \frac{0,55}{0,559 \cdot 0,30 \cdot (1 + 0,261)} = 30\,057,8 \text{ м.}$$

4. Необхідну кількість СКЗ за формулою:

$$N = \frac{L_T}{L} = \frac{850 \cdot 10^3}{30\,057,8} = 28,3 \approx 29.$$

5. Силу дренажного струму в середньому за нормативний строк служби за формулою:

$$I_{др} = \frac{E_{max}}{z \cdot (1 + 2e^{-\alpha L} + \theta)} = \frac{0,55}{8,4 \cdot 10^{-2} \cdot (1 + 2 \cdot e^{-63,6 \cdot 10^{-6} \cdot 30\,057,8} + 0,261)} = 4,21 \text{ А.}$$

### 11.3. Розрахунок і оптимізація параметрів установок катодного захисту

#### 11.3.1. Опір розтіканню струму з анодного заземлення

Величина опору розтікання струму  $R_a$  залежить від конструкції анодного заземлення [20-23].

При комбінованому поверхневому анодному заземленні

$$R_a = \frac{R_B \cdot R_\Gamma}{R_B + R_\Gamma} \quad (11.31)$$

При вертикальному розміщенні електродів:

$$R_a = R_B = \frac{R_{1B}}{n_B + \eta_B}. \quad (11.32)$$

При горизонтальному розміщенні електродів:

$$R_a = R_\Gamma = \frac{R_{1\Gamma}}{n_\Gamma + \eta_\Gamma}. \quad (11.33)$$

де  $R_B$ ,  $R_\Gamma$  – загальний опір розтіканню струму відповідно з вертикальних і горизонтальних електродів.

$R_{1B}$ ,  $R_{1\Gamma}$  – опір розтіканню одиничного електрода відповідно вертикального і горизонтального.

$n_B, n_\Gamma$  – кількість вертикально і горизонтально розміщених електродів в заземленні.

$\eta_B, \eta_\Gamma$  – коефіцієнти екранування.

Електроди анодного заземлення можуть встановлюватися або безпосередньо в ґрунт, або в коксову засипку, що суттєво зменшує швидкість їх розчинення. Опір розтіканню струму з вертикального і горизонтального електродів в коксовій засипці визначається за формулою:

$$R_{1B} = \frac{\rho_\Gamma}{2\pi l_a} \left( \ln \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + l_a}{4h - l_a} + \frac{\rho_a}{\rho_\Gamma} \ln \frac{d_a}{d} \right). \quad (11.34)$$

$$R_{1\Gamma} = \frac{\rho_\Gamma}{2\pi l_a} \left( \ln \frac{2l_a}{d_a} + \ln \left[ \frac{l_a}{4h} + \sqrt{1 + \left( \frac{l_a}{4h} \right)^2} \right] + \frac{\rho_a}{\rho_\Gamma} \ln \frac{d_a}{d} \right). \quad (11.35)$$

де  $l_a$  – висота (при вертикальному розміщенні) або довжина (при горизонтальному) електроду, включаючи засипку;

$d_a, d$  – діаметри відповідно засипки і електроду;

$h$  – відстань від поверхні землі до середини електроду;

$\rho_a$  – питомий електроопір активатора.

При розрахунках комбінованого анодного заземлення величина  $l_a$  дорівнює довжині горизонтальної шини,  $R_{1\Gamma}$  вираховують за формулою:

$$R_{1\Gamma} = \frac{\rho_{\Gamma}}{2\pi l_a} \ln \frac{l_a}{\sqrt{d_a h}}. \quad (\text{При } l_a \gg 12h) \quad (11.36)$$

При встановленні електродів анодного заземлення безпосередньо в ґрунт:

$$R_{1\Gamma} = \frac{0,16 \cdot \rho_{\Gamma}}{l_e} \left( \ln \frac{2l_e}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + l_e}{4h - l_e} \right);$$

$$R_{1\Gamma} = \frac{0,16 \cdot \rho_{\Gamma}}{l_e} \ln \frac{2l_e}{d} \quad (\text{При } h \gg l_e), \quad (11.37)$$

де  $l_e$  – довжина електроду.

Габаритні розміри електродів різних типів наведені в табл. 11.5.

Таблиця 11.5. Габаритні розміри, маса та вартість анодних заземлень із залізо–кремнієвих сплавів

Тип анода	Розміри анода, мм		Розміри анода з активатором та металічним кожухом, мм		Маса анода, кг
	діаметр	довжина	діаметр	довжина	
ЗЖК–12	40	1365	–	–	12
ЗЖК–41Г	75	1365	–	–	41
АК–1	50	1400	185	1420	21
АК–3	40	1365	185	1420	12
АК–1Г	75	1365	225	1700	31
АК–2Г	40	1365	150	1700	12
АКО–1	30	1400	–	–	54
АКО–2	80	1500	–	–	52
АКО–3	80	550	–	–	28
АКО–4	60	1500+2000	–	–	30+40
АКО–5	80	1600	–	–	54
АКО–6	56	1940	–	–	32
АКО–7	180	2000	–	–	140

Величина коефіцієнтів екранування  $\eta_v$  и  $\eta_r$ , враховуючих взаємний вплив електродів, залежить від числа заземлювачів, відстані між ними і параметрів одиничного заземлювача; вона розраховується за формулою

$$\eta = \frac{2R_1}{R_{\text{ц}} + R_K}, \quad (11.38)$$

де  $R_{\text{ц}}$ ,  $R_K$  – опір розтіканню відповідно з центрального та крайнього електродів заземлення:

$$R_{\text{ц}} = R_1 + \frac{\rho_r}{\pi l_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} F_i, \quad (11.39)$$

$$R_K = R_1 + \frac{\rho_r}{2\pi l_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^{n-1} F_i$$

де  $F_i$  – функція:

$$F_i = \ln \left[ \left( B_i + \sqrt{1 + B_i^2} \right) \sqrt{\frac{A_i + B_i + \sqrt{1 + (A_i + B_i)^2}}{A_i - B_i + \sqrt{1 + (A_i - B_i)^2}}} \right] \quad (11.40)$$

$A_i$ ,  $B_i$  – коефіцієнти:

$$A_i = \frac{2h}{i \cdot a}; \quad B_i = \frac{l_{\text{ц}}}{2i \cdot a}; \quad (11.41)$$

$a$  – відстань між серединами електродів;

$n$  – число електродів в анодному заземленні (вибирають непарним).

При оптимізаційному розрахунку величини коефіцієнтів екранування використовують для визначення числа електродів заземлення, функціями якого є  $\eta_v$  и  $\eta_r$ . Тобто, при оптимізації параметрів СКЗ визначення коефіцієнтів екранування може виконуватися виключно методом підбору. В першому наближенні для розрахунку величин  $R_{\text{ц}}$  і  $R_K$  число електродів анодного заземлення необхідно визначати, вибираючи  $\eta_v$  и  $\eta_r$  відповідно до табл. 6.



Таблиця 6. Орієнтовні величини коефіцієнтів екранування при розрахунках опорів  $R_{ц}$  і  $R_{к}$ 

$a/l_e$	0,5	1	2	3	4	6	10
$\eta_v$	0,54	0,65	0,74	0,81	0,86	0,90	0,95
$\eta_r$	0,50	0,58	0,63	0,75	0,80	0,85	0,90

З метою спрощення розрахунків для сталевих трубчатих електродів та електродів з кутика побудовані графічні залежності коефіцієнтів екранування від числа заземлювачів (рис. 11.3, 11.4). Частина з цих даних наведена в табл. 11.7, 11.8.

Таблиця 11.7. Коефіцієнти екранування  $\eta_v$  вертикальних трубчатих заземлювачів, розміщених в ряд, без урахування впливу з'єднувальної полоси.

Число труб, шт	Відношення відстані між трубами до їх довжини		
	$a/l_e=1$	$a/l_e=2$	$a/l_e=3$
2	0,84–0,87	0,90–0,92	0,93–0,95
3	0,76–0,80	0,85–0,88	0,90–0,92
5	0,67–0,72	0,79–0,83	0,85–0,88
10	0,56–0,62	0,72–0,77	0,79–0,83
15	0,51–0,56	0,66–0,73	0,76–0,80
20	0,47–0,50	0,65–0,70	0,74–0,79
50	0,38–0,43	0,56–0,63	0,68–0,74

Примітка. Найменше значення  $\eta_v$  відповідає  $l_e/d_e=20$ , найбільше  $l_e/d_e=68$ , де  $d_e$  – діаметр заземлювача.

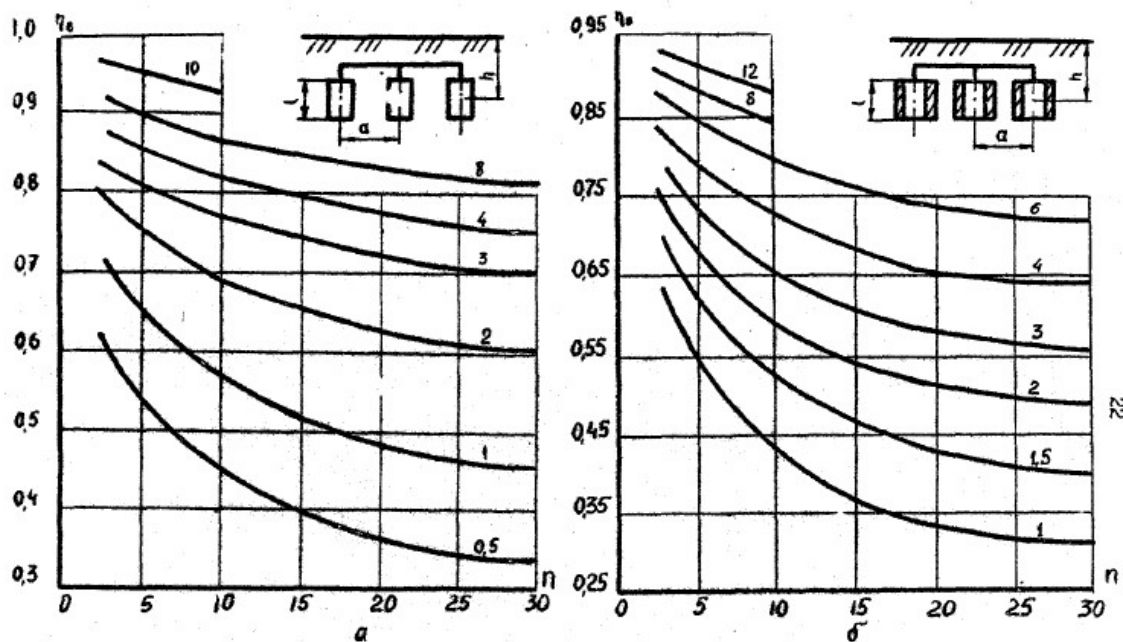


Рис. 11.3. Залежність коефіцієнта екранування вертикальних електродів від їх числа при різних відношеннях  $a/h$ : а – без засипки; б – в коксовий засипці.

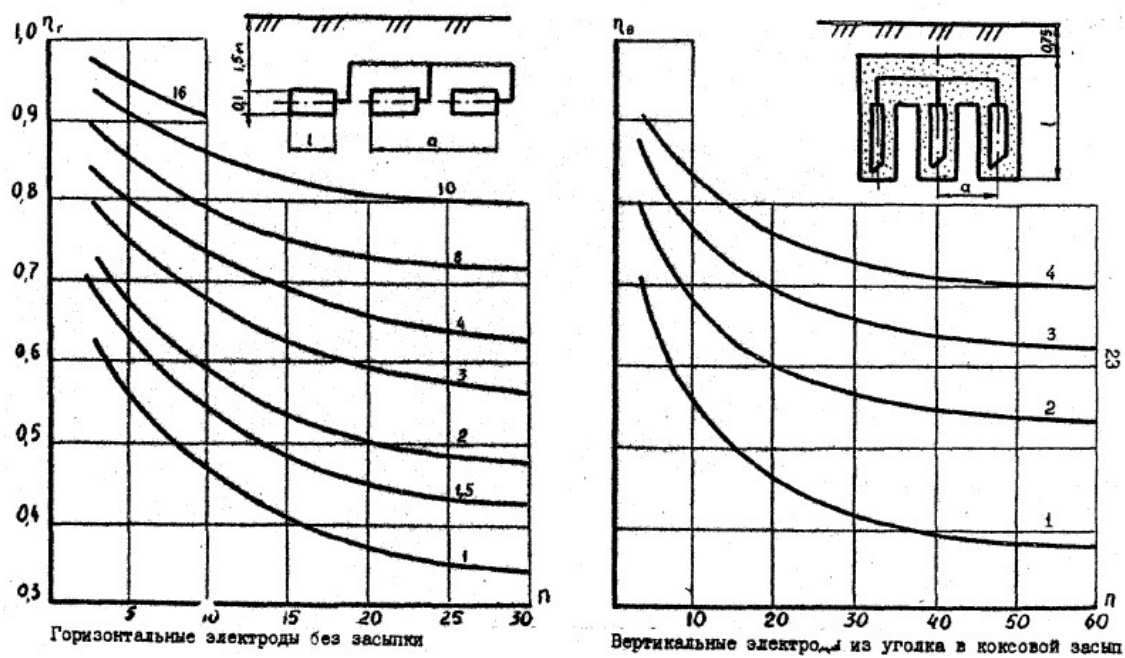


Рис. 11.4. Залежність коефіцієнта екранування сталених електродів від їх числа при різних відношеннях  $a/h$ .

Таблиця 8. Коефіцієнти екранування для горизонтальної робочої шини анодного заземлення, яка складається з розташованих в ряд вертикальних трубчатих електродів, об'єднаних шиною в землі.

a / l <sub>e</sub>	Кількість вертикальних труб							
	3	4	5	8	10	20	30	50
1	0,81	0,77	0,74	0,67	0,62	0,42	0,31	0,20
2	0,91	0,89	0,86	0,79	0,75	0,56	0,46	0,34
3	0,94	0,92	0,90	0,85	0,82	0,68	0,58	0,47

### Задача 8

Визначити опір розтіканню струму скомбінованого анодного заземлення, що складається з 5 вертикальних електродів типу АК–3 і горизонтальної шини. Глибина закладання електродів  $h = 2,5$  м, відстань між ними  $a = 2$  м. Питома електропровідність ґрунту  $\rho_r = 20$  Ом · м.

### Розв'язання

1. Електроди типу АК–3 постачаються упакованими в коксовий дріб'язок. Габаритні розміри заземлювача  $L_a = 1420$  мм,  $d_a = 185$  мм,  $d = 40$  мм,  $\rho_a = 0,4$  Ом · м.

2. Опір розтіканню одиничного вертикального електроду рахуємо за формулою:

$$R_{1B} = \frac{\rho_r}{2\pi \cdot L_a} = \left( \ln \frac{2L_a}{d_a} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h + L_a}{4h - L_a} + \frac{\rho_a}{\rho_r} \ln \frac{d_a}{d} \right) =$$

$$= \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,42} \left( \ln \frac{2 \cdot 1,42}{0,185} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,5 + 1,42}{4 \cdot 2,5 - 1,42} + \frac{0,4}{20} \ln \frac{0,185}{0,04} \right) = 6,51.$$

3. Кількість доданків під знаком суми:

$$\frac{n-1}{2} = \frac{5-1}{2} = 2; \quad n-1 = 5-1 = 4.$$

4. Розрахунок коефіцієнтів  $A_i$  і  $B_i$  представимо у вигляді таблиці:

$$A_i = \frac{2h}{i \cdot a}; \quad B_i = \frac{L_e}{2i \cdot a};$$

i	1	2	3	4
$A_i$	2,5	1,25	0,833	0,625
$B_i$	0,355	0,178	0,118	0,089

5. Величини опору розтіканню з центрального і з крайніх електродів заземлення рахуємо за формулою:

$$R_K = R_1 + \frac{\rho_r}{2\pi L_e} \sum_{i=1}^{n-1} F_i, R_{\text{ц}} = R_1 + \frac{\rho_r}{\pi L_e} \sum_{i=1}^{n-1} F_i,$$

$$F_i = \ln \left[ (B_i + \sqrt{1 + B_i^2}) \sqrt{\frac{A_i + B_i + \sqrt{1 + (A_i + B_i)^2}}{A_i - B_i + \sqrt{1 + (A_i + B_i)^2}}} \right]$$

$$R_K = 6,51 + \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 1,42} \left\{ \ln \left[ (0,355 + \sqrt{1 + 0,355^2}) \sqrt{\frac{2,5 + 0,355 + \sqrt{1 + (0,355 + 2,5)^2}}{2,5 - 0,355 + \sqrt{1 + (2,5 - 0,355)^2}}} \right] \right.$$

$$+ \ln \left[ (0,178 + \sqrt{1 + 0,178^2}) \sqrt{\frac{1,25 + 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 + 0,178)^2}}{1,25 - 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 - 0,178)^2}}} \right]$$

$$+ \ln \left[ (0,118 + \sqrt{1 + 0,118^2}) \sqrt{\frac{0,833 + 0,118 + \sqrt{1 + (0,833 + 0,118)^2}}{0,833 - 0,118 + \sqrt{1 + (0,833 - 0,118)^2}}} \right]$$

$$+ \ln \left[ (0,089 + \sqrt{1 + 0,089^2}) \sqrt{\frac{0,625 + 0,089 + \sqrt{1 + (0,625 + 0,089)^2}}{0,625 - 0,089 + \sqrt{1 + (0,625 - 0,089)^2}}} \right] \Bigg\}$$

$$= 10,57 \text{ Ом.}$$

$$R_{\text{ц}} = 6,51 + \frac{20}{3,14 \cdot 1,42} \left\{ \ln \left[ (0,355 + \sqrt{1 + 0,355^2}) \sqrt{\frac{2,5 + 0,355 + \sqrt{1 + (0,355 + 2,5)^2}}{2,5 - 0,355 + \sqrt{1 + (2,5 - 0,355)^2}}} \right] \right.$$

$$+ \ln \left[ (0,178 + \sqrt{1 + 0,178^2}) \sqrt{\frac{1,25 + 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 + 0,178)^2}}{1,25 - 0,178 + \sqrt{1 + (1,25 - 0,178)^2}}} \right] \Bigg\}$$

$$= 10,57 \text{ Ом.}$$

6. Коефіцієнт екранування рахуємо за формулою:

$$\eta_B = \frac{2R_1}{R_{\text{ц}} + R_K} = \frac{2 \cdot 6,51}{10,57 \cdot 9,53} = 0,648.$$

7. Опір розтіканню з вертикальних електродів заземлення за формулою:

$$R_B = \frac{R_{1B}}{n_B \cdot \eta_B} = \frac{6,51}{5 \cdot 0,648} = 2,01 \text{ Ом.}$$

8. Опір розтіканню з горизонтальної шини за формулою:

$$R_{\Gamma} = R_{1\Gamma} = \frac{0,16 \cdot \rho_{\Gamma}}{L_e} \ln \frac{2L_e}{d} = \frac{0,16 \cdot 20}{1,42} \ln \frac{2 \cdot 1,42}{0,04} = 9,61 \text{ Ом.}$$

9. Опір розтіканню струму з анодного заземлення за формулою:

$$R_a = \frac{R_B \cdot R_{\Gamma}}{R_B + R_{\Gamma}} = \frac{2,01 \cdot 9,61}{2,01 + 9,61} = 1,66 \text{ Ом.}$$

### 11.3.2.Потужність споживана СКЗ. Вибір типу СКЗ

Потужність, що споживається катодними установками, визначається за формулою:

$$P = I_{\text{др}} \cdot \delta E \quad (11.42)$$

де  $I_{\text{др}}$  – дренажний струм (струм СКЗ), рівний подвійному значенню відповідної схеми включення СКЗ.  $\delta E$  – напруга на виході СКЗ:

$$\delta E = I_{\text{др}} \cdot (R_a + R_{\text{пр}}) + |\delta E_1| \quad (11.43)$$

$R$ – опір сполучених проводів довжиною  $L$  і перерізом  $S$  рівні

$$R_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{L_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}} \quad (11.44)$$

$\rho_{\text{пр}}$  – питомий опір матеріалу проводу;  $\delta E_1$  – різниця потенціалів в точці дренажу і в кінці ділянки, що захищається (для станції «нескінченної довжини»  $\delta E_1 = E_{\text{max}} - E(x)$ ; для СКЗ, обслуговуючий короткий трубопровід,  $\delta E_1 = E_{\text{др}} - E_{\text{min}}$ ; для СКЗ, що обслуговує магістральний трубопровід,  $\delta E_1 = E_{\text{min}} - E_{\text{max}}$ . У практиці катодного захисту застосовують мідні та алюмінієві провoda. Із врахуванням розрахованих значень вимоги потужності  $P$ , сили струму  $I_{\text{др}}$  і напруги на вихідних контактах СКЗ і  $\delta E$  по табл. 9 вибирають тип СКЗ.

Таблиця 11.9. Техніко–економічні характеристики катодних станцій

Тип катодної станції	Номинальні вихідні параметри		
	Потужність, кВт	Напруга, В	Струм, А
КГС (КСК) –500	0,5	10–50	10
КГС (КСК) –1200	1,2	10–60	20
КСС–600	0,6	24/12	25/50
КСС–1200	1,2	24/12	50/100
ТСКЗ–1500	1,5	60/30	25/50
ТСКЗ–3000	3,0	60/30	50/100
ТСКЗ–6000	6,0	120/60	50/100
ПСК–1,2	1200	48/24	25/50
ПСК–5,0	5000	96/48	52/104

### Задача 9

Підібрати тип СКЗ для захисту трубопроводу довжиною 10 км при віддаленні анодного заземлення від нього на відстань  $y = 400$  м.л. В системі захисту використовують алюмінієвий провід марки А–16 ( $\rho_{\text{пр}} = 0,023 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $S_{\text{пр}} = 15,89$  мм<sup>2</sup>). Прийняти, що опір розтікання  $R_a = 4,374$  Ом·м, середня сила дренажного струму  $I_{\text{др}} = 3,17$  А, стала розподілення струму  $\alpha = 63,6 \cdot 10^{-6}$  1/м,  $z = 6,1 \cdot 10^{-1}$  Ом,  $\rho_r = 20$  Ом·м.

### Розв'язання

- Опір дренажного проводу становить:

$$R_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} \cdot \frac{l_{\text{пр}}}{S_{\text{пр}}} = 0,023 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{400}{15,86 \cdot 10^{-6}} = 0,73 \text{ Ом}$$

- Аргумент та величини гіперболічних функцій:

$$E_d = \left[ \frac{sh^2(\alpha \cdot x_m) + \frac{\rho_r}{2 \cdot \pi \cdot z \cdot y} \cdot sh(\alpha \cdot x_m) \cdot ch(\alpha \cdot x_m) + 1}{ch(\alpha \cdot x_m)} \right]$$

$$\alpha x_m = 63,6 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,318$$

$$ch(0,318) = 1,051 sh(0,318) = 0,321$$

- Величина накладної різниці потенціалів в точці дренажу:

$$E_{др} = -0,30 \cdot \left( \frac{0,321^2 + \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 400} \cdot 0,321 \cdot 1,051 + 1}{1,051} \right)$$

4. Напруга на контактах СКЗ:

$$\Delta E = I_{др} \cdot (R_a + R_{пр}) + [\Delta E_1]$$

$$\Delta E = 4,17 \cdot (4,374 + 0,73) + [-0,33 - (-0,30)] = 21,3В$$

5. Максимальна величина струму в трубопроводі:

$$I_m = \frac{E_{др \cdot ch(\alpha \cdot x_m)} - E_{min}}{2 \cdot z \cdot \left[ sh(\alpha \cdot x_m) + \frac{\rho_r}{2 \cdot \pi \cdot z \cdot y} \cdot ch(\alpha \cdot x_m) \cdot \frac{\rho_r}{2 \cdot \pi \cdot z \cdot \sqrt{x_m^2 + y^2}} \right]}$$

$$I_m = \frac{[-0,33 \cdot 1,051 - (-0,30)]}{2 \cdot 0,061 \cdot \left( 0,321 + \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot 400} \right)} \cdot 1,051$$

$$- \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,061 \cdot \sqrt{5000^2 + 400^2}} = 0,85A$$

6. Величина дренажного струму:

$$I_{др} = 2 \cdot I_m = 2 \cdot 0,85 = 1,7A$$

7. Потужність, яку споживає СКЗ:

$$P = I_{др} \cdot \Delta E = 1,7 \cdot 21,3 = 36,2 В$$

8. За розрахунковими величинами потужності та сили струму з табл.9тип СКЗ – КСГ (КСК)–500.

### 11.3.3. Термін служби анодного заземлення

Термін служби анодного заземлення  $T$ , установленного в ґрунт, визначається за формулою [20-23]:

$$T = \frac{G \cdot n \cdot \eta_u}{I_{др.ср} \cdot \varepsilon} \quad (11.45)$$

де  $G$  – вага одного електрода;  $\eta_u$  – коефіцієнт використання електродів,  $\eta_u = 0,77$ ;  $I_{др.ср}$  – середнє значення сили струму у лунцюзі СКЗ;  $\varepsilon$  – електрохімічний еквівалент матеріалу електродів.

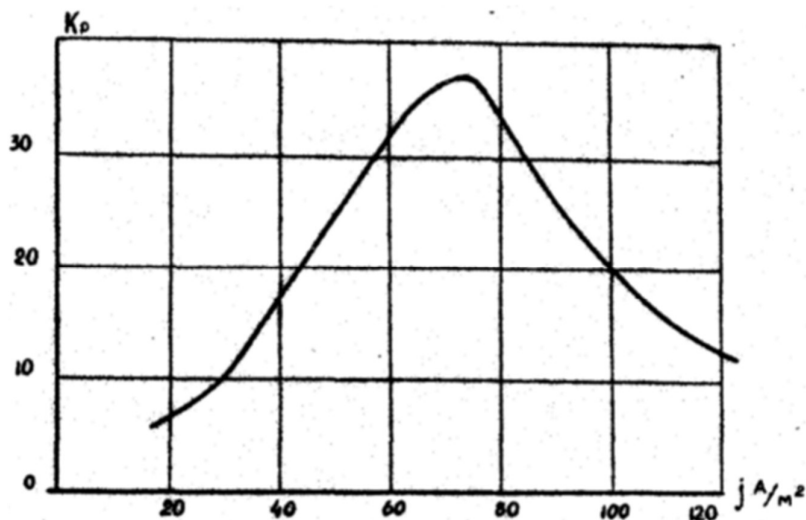


Рис. 11.5. Залежність коефіцієнту  $K_p$  від густини анодного струму

Величини електрохімічного еквіваленту електродів із різних матеріалів наступні: сталеві аноди без активатора – 10 кг/(А·год); сталеві аноди з активатором – 3...4 кг/(А·год); залізокремнієві аноди без активатора – 0,2 кг/(А·год); залізокремнієві аноди з активатором – 0,1 кг/(А·год).

Практика експлуатації установок катодного захисту, а також спеціальні дослідження показали, що строк служби анодних заземлень, установлених безпосередньо в ґрунт, мало залежить від густини струму, заземлення, що розмикається. Однак при густині струму вищій 10 А/см<sup>2</sup> можливе утворення на поверхні електродів шару продуктів корозії, що володіють високим опором, що вимагає збільшенню напруги, а відповідно і потужності СКЗ, що споживається.



У електродів, що встановлюються в коксовий дріб'язок, помітна зміна напруги СКЗ спостерігається при густині струму більше 14 А/м<sup>2</sup>. Строк служби [20-23]:

$$T_a = K_p \cdot T, \quad (11.46)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт зниження швидкості руйнування анодів, що залежить від густини струму (рис. 11.5).

$$j = \frac{I_{др}}{S_a};$$

$S_a$  – сумарна поверхня робочих електродів анодного заземлення.

Якщо за умовою задана величина електрохімічного еквівалента матеріалу електрода в коксовій засипці, розрахунок строку служби заземлення варто вести по формулі (11.45). У випадку коли розрахований строк служби анодного заземлення становить не менше 10 років, необхідно збільшити число електродів у ньому.

### Задача 10

Визначити термін служби анодного заземлення із вуглецевої конструкційної сталі загальною вагою  $G = 500$  кг, якщо  $I_{др\text{ ср}} = 4$  А,  $q = 8$  кг/А·год.

### Розв'язання

Термін служби розраховуємо за формулою (45):

$$T = \frac{500 \cdot 0,77}{4 \cdot 8} = 11,9 \text{ років}$$

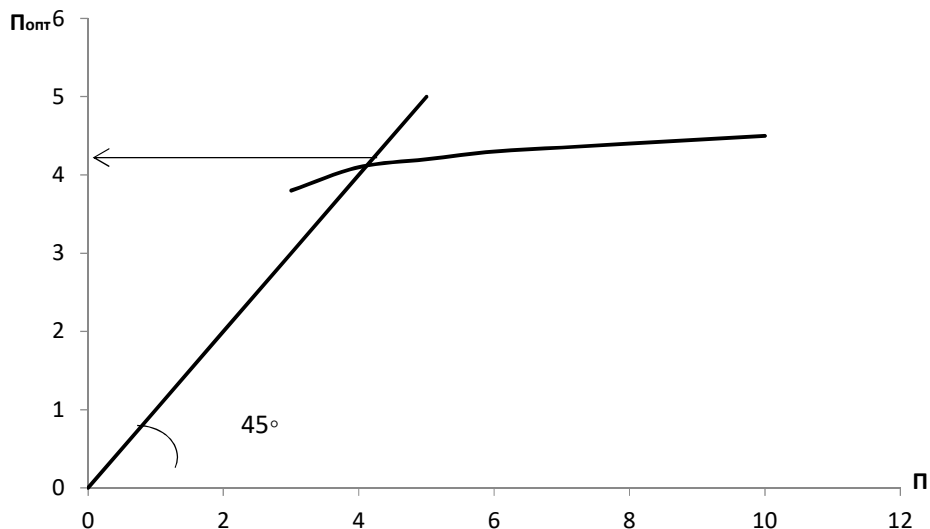


Рис. 11.6. Графічне визначення кількості електродів анодного заземлення

#### 11.3.4. Кількість електродів анодного заземлення

Кількість електродів анодного заземлення  $P$  є техніко–економічною величиною. Зі збільшенням  $P$ , з одного боку збільшуються капітальні затрати на електроди і амортизаційні відрахування по ним, а з іншої сторони – збільшується опір розтікання струму з анодного заземлення. Мінімальній величині приведених затрат на спорудження і експлуатацію анодного заземлення відповідає оптимальне число електродів [20-23] .

$$P_{\text{опт}} = I_{\text{др.ср}} \sqrt{\frac{8,76 \cdot R_{IB} \cdot \sigma_{\text{э}}}{\sigma_{\text{а}} \cdot \eta \cdot \eta_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{э}} \cdot (\varepsilon + \xi)}}, \quad (11.47)$$

де  $R_{IB}$  – опір розтікання одиничного електрода, Ом;  $\sigma_{\text{э}}$  – середня вартість електроенергії, грн/кВт·год;  $\sigma_{\text{а}}$  – вартість одного електрода, грн.;  $\eta$  – ККД катодної установки,  $\eta = 0,7$ ;  $\varepsilon$  – нормативний коефіцієнт окупності капітальних вкладень,  $\varepsilon = 0,12$  1/год;  $\xi$  – норматив амортизаційних відрахувань для установок електрохімічного захисту,  $\xi = 0,1481$ /год.

Оскільки величина коефіцієнта екранування залежить від числа електродів заземлення, то рівняння (11.47) відносно  $P_{\text{опт}}$  може біти

вирішене тільки методом послідовних наближень. Найзручніше зробити це графічно: задавшись величиною  $\Pi$ , вираховують  $\eta_{\text{э}}$  по формулах (11.38) – (11.41), а потім по формулі (11.47) знаходять  $\Pi_{\text{опт}}$ . По результатам розрахунку будують криву залежності  $\Pi_{\text{опт}} = f(\Pi)$ . Точка перетину її з прямою, що проводиться з початку координат під кутом  $45^\circ$ , відповідає фактичному значенню  $\Pi_{\text{опт}}$ .

### Задача 11

Визначити оптимальну кількість вертикальних трубчастих електродів анодного заземлення, встановлених у коксовій засипці, при наступних даних:  $I_{\text{др.ср}} = 4 \text{ А}$ ;  $R_{\text{IV}} = 20 \text{ Ом}$ ;  $\sigma_{\text{э}} = 0,02 \text{ грн/кВт}\cdot\text{год}$ ;  $\sigma_{\text{а}} = 25 \text{ грн}$ ;  $\eta_{\text{н}} = 0,77$ ;  $\frac{\alpha}{l_{\text{э}}} = 2$ .

### Розв'язання

1. Підставляючи числові значення заданих величин в формулу (47), отримаємо

$$\Pi_{\text{опт}} = 4 \sqrt{\frac{8,76 \cdot 20 \cdot 0,02}{25 \cdot 0,7 \cdot 0,77 \cdot \eta_{\text{э}} \cdot (0,12 + 0,148)}} = \frac{3,55}{\sqrt{\eta_{\text{э}}}}.$$

2. Задаючись  $\Pi$ , по графіку  $\eta_{\text{э}} = f(\Pi)$  на рис. 11.3, 11.4 знаходимо відповідне значення коефіцієнта екранування, а після підстановки в рівняння – розраховану кількість електродів:

$\Pi=3$	$\eta_{\text{э}}=0,75$	$\Pi_{\text{опт}} = 4,099$
$\Pi=5$	$\eta_{\text{э}}=0,70$	$\Pi_{\text{опт}} = 4,24$
$\Pi=10$	$\eta_{\text{э}}=0,60$	$\Pi_{\text{опт}} = 4,58$ .

3. Нанісни отриману точку на графік (рис. 11.6), отримаємо, що рівність заданої і розрахованої кількості електродів анодного заземлення має місце при  $\Pi=4$ , яке і є оптимальним.

Аналогічно вирішується задача і при використанні формул (11.38) – (11.41) для знаходження коефіцієнта екранування.

### 11.3.5. Переріз дренажного проводу катодної установки

Корисна енергія, що іде на захист трубопроводу, витрачається на вхідний опір трубопроводу. Вона в середньому складає 1–5% від загального електроспоживання на катодний захист. Другі види втрат енергії не має прямого відношення до захисту, однак без них неможливо їх забезпечити. Так втрати електроенергії в дренажній лінії складають практично від 10 до 50% від загальної витрати електроенергії на захист трубопроводу [20-23].

При зменшенні опору дренажної лінії за рахунок збільшення перерізу проводів  $S_{\text{пр}}$  може скоротити витрату енергії яка витрачається. Однак при збільшенні  $S_{\text{пр}}$  зростає вартість дренажної лінії. Вирішення техніко–економічної задачі дає наступний вираз для оптимального перерізу дренажного проводу:

$$S_{\text{пр.опт}} = 2,95 \cdot I_{\text{др.ср}} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{э}} \cdot \rho_{\text{пр}}}{C_1 \cdot \eta \cdot (\varepsilon + \xi)}}, \quad (48)$$

де  $C_1$ – коефіцієнт залежності вартості установки  $I$  пог.м дренажної лінії  $\sigma_{\text{пр}}$  від перерізу проводів.

$$\sigma_{\text{пр}} = C_1 \cdot S_{\text{пр}} + C_2.$$

Дренажний кабель може бути прокладено або по стовпам повітряних ліній або в траншеї. Прокладка кабелю в траншеї, як правило дорожча. Так, для алюмінієвого кабелю типу АСБ–І в траншеї  $C_1=0,01$  грн/м.мм<sup>2</sup>;  $C_2 = 1,3$  грн/м, а для його підвіски по стовпам повітряних ліній  $C_1=0,0035$  грн/м.мм<sup>2</sup>;  $C_2 = 0,025$  грн/м. Крім того, при прокладці кабелю в траншеї можливий його розрив сільськогосподарською технікою. Тому в подальшому будемо розглядати тільки варіант прокладання дренажного кабелю по стовпам повітряних ліній.

## Задача 12

Підібрати алюмінієвий дренажний провід для катодної установки. Дренажна лінія – повітряна з підвіскою проводу на дренажних стовпцях з залізобетонними приставками. Відсутні дані взяти з прикладу 9, 11.

### Розв'язання

1. По формулі (48) знаходимо

$$S_{\text{пр.опт}} = 2,95 \cdot 4 \sqrt{\frac{0,02 \cdot 0,029 \cdot 10^{-6}}{0,0035 \cdot 0,7 \cdot (0,12 + 0,148)}} = 0,011 \text{ мм}^2.$$

2. Вибираємо найближчий по площі перетину алюмінієвий провід марки АІ6.

### 11.3.6. Віддалення анодного заземлення від магістрального трубопроводу

Зі збільшенням відстані між анодним заземленням і трубопроводом  $U$  збільшується довжина плеча захисту однієї катодної станції, а відповідно, зменшується їх число і вартість катодного захисту. Однак при збільшенні  $U$  збільшується вартість споруд лінії постійного струму, що живить СКЗ. Крім того, з видаленням анодного заземлення від трубопроводу при тій же різниці потенціалів «трубопровід–грунт» в точці дренажу збільшується сила струму катодної установки, її споживча потужність, переріз проводів лінії постійного струму, число заземлювачів і вартість анодного заземлення. Вибір оптимального видалення анодного заземлення від трубопроводу проводиться із умови мінімуму відхилення величини витрат на спорудження і експлуатацію катодної установки до довжини її плеча ділянки яка захищається, тобто по мінімуму функції

$$\frac{\Pi}{L} = \frac{K_3 \cdot (\varepsilon + \xi) + \vartheta_3}{L} \quad (11.49)$$

Капітальні затрати  $K_3$  на здійснення катодного захисту складаються з:

- вартість анодного заземлення

$$K_a = \sigma_a \cdot \Pi; \quad (11.50)$$

- вартість опор повітряної лінії

$$K_{оп} = 2\sigma_{ко} + \sigma_{по} \left( \frac{y}{50} - 1 \right); \quad (11.51)$$

- вартість проводу повітряної лінії

$$K_{пр} = (C_1 \cdot S_{пр} + C_2) \cdot L; \quad (11.52)$$

– вартість станції катодного захисту  $K_{ст}$  і складають

$$K_3 = K_a + K_{оп} + K_{пр} + K_{ст}, \quad (11.53)$$

де  $\sigma_{ко}, \sigma_{по}$  – вартість кінцевої і проміжних опор повітряної лінії, орієнтовно  $\sigma_{ко} = 86$  грн,  $\sigma_{по} = 25$  грн.

Експлуатаційні витрати складаються з амортизаційних відрахувань від вартості основних фондів  $A = \xi \cdot K_3$  і вартість електроенергії  $\Xi_3$  на забезпечення катодного захисту:

$$\Xi_3 = \sigma_{\Xi} \cdot P_{ст} \cdot \tau, \quad (11.54)$$

де  $P_{ст}$  – споживча СКЗ потужність, розрахована по середній величині дренажного струму;  $\tau$  – число годин роботи катодної станції в році.  $\tau = 8760$  год.

Величина оптимального видалення анодного заземлення визначається методом послідовного підбору варіантів. Рекомендується дослідити функцію П/Л на мінімум при значеннях  $Y \leq 2000$  м. При чому при величині до 300 м розрахунки слід виконувати з кроком 50 м, а при  $Y > 300$  м – з кроком 100 – м. Мінімальне віддалення анодного заземлення від трубопроводу визначимо з умови, що підкореневий вираз у формулі (29) не може бути менший нуля, тобто має бути

$$(1 + \theta) \left( \frac{E_{max}}{E_{min}} \right)^2 \leq 1.$$

Звідки

$$Y_{min} = \frac{\rho_{\Gamma}}{2\pi Z_{\kappa} \left[ \left( \left( \frac{E_{max}}{E_{min}} \right)^2 - 1 \right) \right]}$$

Оскільки величина  $n$  залежить від сили дренажного струму, яка в свою чергу є функцією  $Y$ , при варіюванні відстані від анодного заземлення до трубопроводу необхідно кожного разу оптимізувати число електродів заземлення. Одночасно кожного разу розраховують коефіцієнти екранування. Тобто розрахунок за пунктом 11.3.6 включає і розрахунки за пунктами 11.3.4, 11.3.5.

Результати розрахунків оформляють у вигляді таблиці, в якій обов'язково привалються результати розрахунків при оптимальному віддаленні заземлення від трубопроводу [20-23].

### **Задача 13**

Визначити оптимальну величину віддалення ( $Y, m$ ) анодного заземлення від трубопроводу діаметром  $D = 1020$  мм та з товщиною стінки  $\delta = 10$  мм, якщо дренажна лінія – повітряна з підвіскою алюмінієвого проводу, початковий перехідний опір «трубопровід–грунт» складає  $R_{поч} = 20000$  Ом·м<sup>2</sup>, середня вартість електроенергії  $\sigma_{ен} = 0,02$  р./кВт·год, показник швидкості старіння ізоляції  $\beta = 0,125$  1/рік, тип анодного заземлення – АКЗ.

### **Розв'язання**

Розрахунки виконуються за методикою, яка була розроблена в задачах 1–12. Тому ми їх опускаємо. Цікава тільки підсумкова табл. 11.10, де об'єднані результати розрахунків для різних величин.

Таблиця 11.10. Результати розрахунків параметрів катодного захисту магістрального трубопроводу

У, м	К <sub>в</sub>	L, км	I <sub>др.ср</sub> , А	η	η <sub>окр</sub>	R <sub>а</sub> , Ом	S <sub>д</sub> , мм	R <sub>д</sub> , Ом
100	0,642	6,6	2,01	14,53	15	3,46	5,72	0,51
250	0,575	23,2	3,57	8,41	9	3,65	9,60	0,76
300	0,569	25,4	3,82	7,64	8	4,374	15,89	0,55

ΔE <sub>ср</sub> , В	P <sub>ср</sub> , кВт	Э <sub>з</sub> , руб/рік	K <sub>а</sub> , руб	K <sub>оп</sub> , руб	K <sub>ст</sub> , руб	K <sub>д</sub> , руб	П/L, руб/км·рік
8,23	16,54	2,9	375	195	200	4,5	31,9
15,98	57,07	10	225	270	200	14,65	8,63
19,06	12,83	12,76	175	295	320	24,2	9,09

#### Задача 14

Визначити оптимальні параметри катодного захисту магістрального трубопроводу діаметром 820 мм, довжиною 1200 км, що має товщину стінки рівну 9 мм. Трубопровід прокладений в місцевості ділянки якої мають наступні значення питомого електроопору ґрунту.

Розподіл ґрунтів з різним електроопором на трасі трубопроводу

Доля довжини трубопроводу l/L	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3
Питомий електроопір, Ом·м <sup>2</sup>	170	180	70	40	20	10

Дренажна лінія – повітряна з підвіскою алюмінієвого проводу на дерев'яних стовпах з залізобетонними приставками. Початковий перехідний опір «трубопровід – ґрунт» рівний 9000 Ом·м<sup>2</sup>, середня вартість електроенергії – 0,02 р./кВт·год, показник швидкості старіння покриття – 0,125 1/ рік. Анодне заземлення виконати з електродів довжиною 1,4 м, діаметром 0,03 м, масою 10 кг. Вартість одного електрода – 20р., електрохімічний еквівалент матеріалу електродів – 0,2 кг/(А·рік) .



### Розв'язання

1. Визначаємо середнє значення питомого електроопору ґрунту вздовж траси трубопроводу за формулою (11.1) :

$$\rho_r = \sum_{i=1}^6 \rho_{ri} \frac{l_i}{L} = 170 \cdot 0.1 + 180 \cdot 0.1 + 70 \cdot 0.2 + 40 \cdot 0.1 + 20 \cdot 0.2 + 10 \cdot 0.3 = 60 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

2. Нормальний час експлуатації установок катодного захисту складає 9,5 років. Визначаємо перехідний опір «трубопровід – ґрунт» до кінця нормативного строку експлуатації установок катодного захисту за формулою (11.4) :

$$R_{\text{ПК}} = 9000 \cdot e^{-0.125 \cdot 9.5} = 2737.9 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

3. Середнє значення перехідного опору «трубопровід – ґрунт» за формулою (11.6) :

$$R_{\text{П.СР}} = \frac{9000}{0.125 \cdot 9.5} \cdot (1 - e^{-0.125 \cdot 9.5}) = 5262.2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

4. Опір одиниці довжини ізоляційного покриття до кінця нормативного строку експлуатації установок катодного захисту за формулою (11.10):

$$R_{\text{ІЗ}(\tau_{\text{НС}})} = \frac{2737.9}{3.14 \cdot 0.82} = 1062.9 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

5. Середній опір одиниці довжини ізоляційного покриття за формулою (10):

$$R_{\text{ІЗ.СР}} = \frac{5262.2}{3.14 \cdot 0.82} = 2042.8 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

6. Повздовжній опір одиниці довжини трубопроводу за формулою (11.2):

$$R_{\text{Т}} = \frac{0.245 \cdot 10^{-6}}{3.14 \cdot 0.009 \cdot (0.82 - 0.009)} = 10.68 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$$

7. Середнє значення вхідного опору трубопроводу за нормативний строк експлуатації катодних установок за формулою (11.11):

$$Z_{CP} = \sqrt{\frac{10,68 \cdot 10^{-6} \cdot 1062,9}{2}} = 73,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

8. Теж саме до кінця нормативного строку експлуатації за формулою (11.12):

$$Z_K = \frac{10,68 \cdot 10^{-6} \cdot 1062,9}{2} = 52,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

9. Постійна розподілення струму та потенціалів вздовж трубопроводу до кінця нормативного строку експлуатації катодних установок за формулою (11.13):

$$\alpha = \sqrt{\frac{10,68 \cdot 10^{-6}}{1062,9}} = 99,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/м}$$

10. Задаємо віддалення анодного заземлення від трубопроводу  $Y=350\text{м}$  та визначаємо параметр:

$$\theta = \frac{60}{2 \cdot 3,14 \cdot 52,9 \cdot 10^{-3} \cdot 350} = 0,515$$

11. Коефіцієнт взаємного впливу СКЗ за формулою (11.29):

$$K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,55}\right)^2 \cdot (1 + 0,515)}} = 0,574$$

12. Протяжність зони захисту трубопроводу однієї СКЗ до кінця нормативного строку експлуатації за формулою (11.28):

$$L_1 = \frac{2}{99,6 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ \frac{0,55}{0,574 \cdot \frac{0,3}{0,55} \cdot (1 + 0,515)} \right] = 15071 \text{ м}$$

13. Середнє значення сили струму навантаження СКЗ за формулою (11.27):

$$I_{ДР.СР.} = \frac{0,55}{73,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ 1 + 2 \exp(-99,6 \cdot 10^{-6} \cdot 15071) + 0,515 \cdot \frac{52,9 \cdot 10^{-3}}{73,4 \cdot 10^{-3}} \right]} = 4,13$$

14. Припустимо, що глибина закладення середини електродів анодного заземлення  $h$  рівна 2,2 м, а відстань між ними рівна 7 м.

15. Опір розтікання з одиничного вертикально розміщеного електроду за формулою (11.34) :

$$R_{1B} = \frac{0.16 \cdot 60}{1.4} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot 1.4}{0.03} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2.2 + 1.4}{4 \cdot 2.2 - 1.4} \right) = 31.9 \text{ Ом}$$

16. Припустимо, що число електродів анодного заземлення  $n = 5$ .

Розрахунок коефіцієнтів  $A_1$  та  $B_1$  представимо у вигляді таблиці:

	1	2	3	4
$A_1$	0.63	0.31	0.21	0.16
$B_1$	0.1	0.06	0.033	0.025

17. Опір розтікання з центрального електроду заземлення за формулою (11.39):

$$R_{ц} = 31.9 + \frac{60}{3.14 \cdot 1.4} \left\{ \ln \left[ \left( 0.1 + \sqrt{1 + 0.1^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{0.63 + 0.1 + \sqrt{1 + (0.63 + 0.1)^2}}{0.63 - 0.1 + \sqrt{1 + (0.63 - 0.1)^2}}} \right] + \right. \\ \left. + \ln \left[ \left( 0.05 + \sqrt{1 + 0.05^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{0.31 + 0.05 + \sqrt{1 + (0.31 + 0.05)^2}}{0.31 - 0.05 + \sqrt{1 + (0.31 - 0.05)^2}}} \right] \right\} \\ = 35.72 \text{ Ом}$$

18. Опір розтікання з крайнього електроду анодного заземлення за формулою (11.39):

$$\begin{aligned}
R_K &= 31.9 + \frac{60}{2 \cdot 3.14 \cdot 1.4} \\
&\cdot \left\{ \ln \left[ \left( 0.1 + \sqrt{1 + 0.1^2} \right) \cdot \frac{\sqrt{0.63 + 0.1 + \sqrt{1 + (0.63 + 0.1)^2}}}{\sqrt{0.63 - 0.1 + \sqrt{1 + (0.63 - 0.1)^2}}} \right] \right. \\
&+ \ln \left[ \left( 0.05 + \sqrt{1 + 0.05^2} \right) \cdot \frac{\sqrt{0.31 + 0.05 + \sqrt{1 + (0.31 + 0.05)^2}}}{\sqrt{0.31 - 0.05 + \sqrt{1 + (0.31 - 0.05)^2}}} \right] \\
&+ \ln \left[ \left( 0.033 + \sqrt{1 + 0.033^2} \right) \cdot \frac{\sqrt{0.21 + 0.033 + \sqrt{1 + (0.21 + 0.033)^2}}}{\sqrt{0.21 - 0.033 + \sqrt{1 + (0.21 - 0.033)^2}}} \right] \\
&+ \ln \left[ \left( 0.025 + \sqrt{1 + 0.025^2} \right) \cdot \frac{\sqrt{0.16 + 0.025 + \sqrt{1 + (0.16 + 0.025)^2}}}{\sqrt{0.16 - 0.025 + \sqrt{1 + (0.16 - 0.025)^2}}} \right] \Big\} \\
&= 34.59 \text{ Ом}
\end{aligned}$$

19. Коефіцієнт екранування електродів анодного заземлення за формулою (11.38):

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{2 \cdot 31.9}{35.72 + 34.59} = 0.91$$

20. Оптимальне число електродів анодного заземлення за формулою (11.47):

$$\eta'_{\text{Э}} = 4.13 \cdot \sqrt{\frac{8.76 \cdot 31.9 \cdot 0.02}{20 \cdot 0.95 \cdot 0.7 \cdot 0.91 \cdot (0.15 + 0.148)}} = 5.1$$

Тобто, прийняте та розраховане значення електродів співпадають.

21. Опір розтікання струму з анодного заземлення за формулою (11.32):

$$R_a = \frac{31.9}{5 \cdot 0.91} = 7 \text{ Ом}$$

22. Оптимальний переріз дренажного дроту за формулою (11.48):

$$S_{\text{Д}} = 2.95 \cdot 4.13 \cdot \sqrt{\frac{0.029 \cdot 0.02}{0.01 \cdot 0.7 \cdot (0.15 + 0.148)}} = 6.7 \text{ мм}^2$$

Вибираємо найближчий більший переріз серійно випущених дротів, що є рівним  $S_d = 16 \text{ мм}^2$  (дріт А-16)

23. Опір дренажної лінії за формулою (11.44):

$$R_d = 0.029 \cdot \frac{350}{9.6} = 1.05 \text{ Ом}$$

24. Середнє значення напруги на вихідних контактах СКЗ за формулою (11.43):

$$\Delta E_{\text{ср}} = 4.13 \cdot (7 + 1.05) + (0.55 - 0.3) = 37.5 \text{ В}$$

25. Середня величина потужності, що споживається СКЗ, за формулою (11.42):

$$P_{\text{ср}} = 4.13 \cdot 37.5 = 154.9 \text{ В}$$

26. Відповідно до знайдених значень  $I_{\text{др.ср}}$ ,  $\Delta E_{\text{ср}}$  та  $P_{\text{ср}}$  обираємо тип катодної станції – КСТ (КСК) – 500 з параметрами : потужність – 0,5 кВт; напруга на контактах – 10:50 В; струм – 10А; вартість – 410 грн.

27. Виконуємо розрахунок економічних показників катодного захисту за заданому віддаленні анодного заземлення від трубопроводу:

$K_a$  – вартість анодного заземлення:

$$K_a = 20 \cdot 5 = 100 \text{ грн.}$$

$K_{\text{оп}}$  – вартість опор повітряної лінії:

$$K_{\text{оп}} = 2 \cdot 85 + 25 \cdot \left( \frac{350}{50} - 1 \right) = 320 \text{ грн.}$$

$K_d$  – вартість дроту повітряної лінії :

$$K_d = (0.01 \cdot 9.6 + 1.3) \cdot 350 = 488.6 \text{ грн.}$$

$K_{\text{вит}}$  – капітальні витрати на одну СКЗ:

$$K_{\text{вит}} = 100 + 320 + 488.6 + 410 = 1318 \text{ грн.}$$

$\mathcal{E}_л$  – вартість електроенергії, що споживає одна СКЗ:

$$\mathcal{E}_л = 0.02 \cdot \frac{154.9}{1000} \cdot 8760 = 27.1 \frac{\text{грн.}}{\text{год}}$$

П/Л – питомі наведені витрати на катодний захист:

$$\Pi/L = \frac{27.1 + 1318 \cdot (0.15 + 0.148)}{15.071} = 19.1 \frac{\text{грн.}}{\text{км}}$$

28. Задаючи інші значення питомого анодного заземлення від трубопроводу, аналогічно обчислюємо питомі приведені витрати на катодний захист і для них. Результати обчислень наведемо у таблиці.

Результати розрахунків по визначенню оптимального віддалення анодного заземлення від трубопроводу

Показники, їх розмірність	Величина показників при віддаленні, м					
	200	250	300	350	400	450
$K_B$	0,592	0,587	0,58	0,574	0,568	0,566
$L$ , км	9,15	11,05	13,1	15,071	17,2	19,8
$I_{\text{др.ср}}$ , А	3,05	3,4	3,78	4,13	4,49	4,85
$\Pi_E$ , ШТ	3	3	4	5	5	6
$R_a$ , Ом	8	8	7,5	7	7	6,5
$S_{\text{ПР}}$ , мм <sup>2</sup>	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
$R_{\text{ПР}}$ , Ом	0,79	0,87	0,96	1,05	1,14	1,25
$\Delta E_{\text{ср}}$ , В	28,6	29,5	33,4	37,5	41,6	46,2
$P_{\text{ср}}$ , Вт	87,2	89,7	126,3	154,9	186	224,1
$K_a$ , р.	60	60	80	100	100	120
$K_{\text{оп}}$ , р.	245	270	296	320	345	370
$K_{\text{пр}}$ , р.	279,2	349	418,8	488,6	558,4	632,1
$K_z$ , р.	994,2	1080	1213,8	1318	1413,4	1632,1
$E_L$ , р./рік	14,1	18,7	22,9	27,1	31,3	35,5
$\Pi/L$ , р./км	30,1	25,2	19,3	19,1	20,4	22,6

29. За результатами розрахунку будуємо графік у координатах  $\Pi/L_1$  –  $y$ , звідки видно, що оптимальним віддаленням анодного заземлення є  $y = 350$  м.

30. Для варіанта, коли питомі приведені витрати на катодний захист мінімальні, тобто  $y = 350$  м, визначаємо необхідне число СКЗ для захисту всього трубопроводу:

$$N = \frac{1200}{15,071} \approx 80.$$

31. Термін служби анодного заземлення за формулою (11.45)

$$T = \frac{10 \cdot 0,95 \cdot 5}{4,13 \cdot 0,2} = 57,5 \text{ років.}$$

Оскільки термін служби анодного заземлення перевищує 10 років, то, як наслідок, катодний захист трубопроводу забезпечений. У протилежному випадку необхідно збільшити число електродів анодного заземлення.

#### **11.4. Методи збільшення зони захисту катодних установок**

В умовах, коли електрозабезпечення установок катодного захисту на трасі трубопроводу ускладнене, необхідно використовувати можливості для збільшення зони захисту СКЗ. Цього можливо досягти підвищуючи накладену різницю потенціалів у точці дренажу. Проте максимальна величина накладеної різниці потенціалів регламентована. Тому в практиці катодного захисту знайшли застосування катодні установки з протипотенціаломі з екранним заземленням. Доцільність їх використання у кожному конкретному випадку обґрунтовується техніко–економічним розрахунком [20-23].

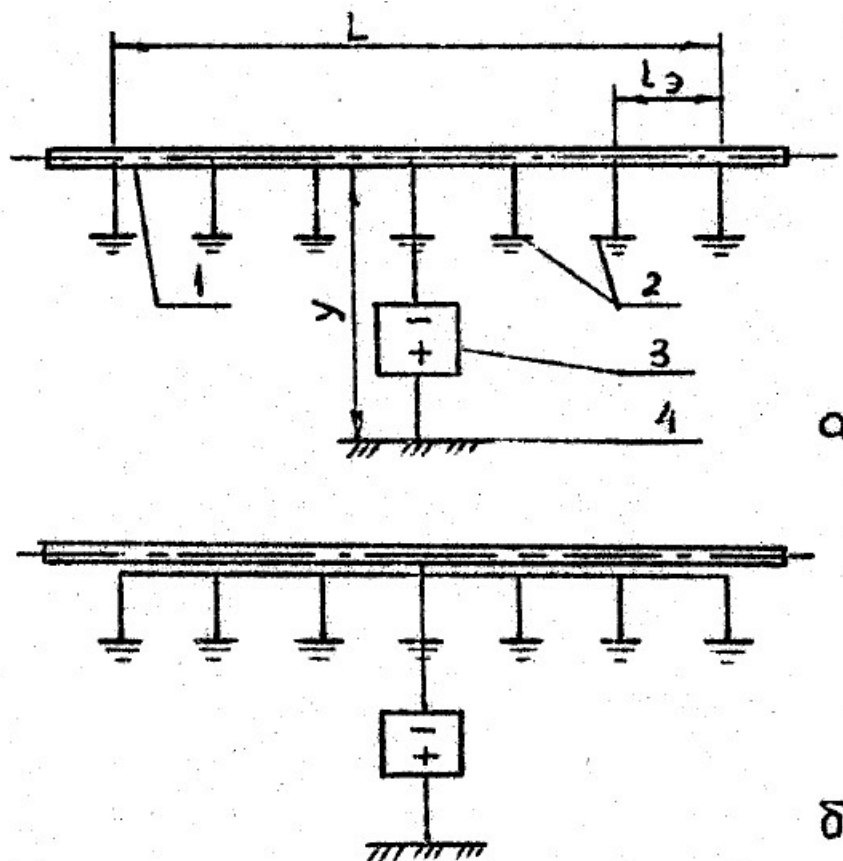


Рис. 11.7. Схема катодного захисту з екранним заземленням: а – екрани підключені до трубопроводу; б – екрани підключені до мінуса катодної станції. 1 – трубопровід; 2 – екранні заземлення; 3 – катодна станція; 4 – анодне заземлення.

#### 11.4.1. Катодні установки з екранними заземленнями

Екранні заземлення підключають або безпосередньо до мінусу катодної станції, або до трубопроводу (рис. 11.7). При підключенні екранних заземлень в районі ділянки, де є перевищення накладеної різниці потенціалів вище припустимої, надходження струму анодного заземлення в трубопровід обмежується, і тим самим знижується потенціал трубопроводу на цій ділянці. Екранні заземлення можна розташовувати з обох сторін від трубопроводу, а виконувати їх рекомендовано у вигляді горизонтальних електродів. Накладена різниця потенціалів у точці дренажу



$E'_{\max}$ , необхідна для забезпечення захисту підвищеної протяжності  $L$ , визначається за формулою [20-23]

$$E'_{\max} = \frac{0,5 \cdot E'_{\min} \cdot e_2^{\alpha \cdot l'}}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1-k}{\theta}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot y}{l'} \cdot e_2^{\alpha \cdot l'} - \frac{k}{\theta} - 1 \right]}, \quad (11.55)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що дорівнює відношенню сумарного струму екранів  $I_E$  до струму катодної установки  $I_{\text{ДР}}$  (орієнтовно  $k = 0,05+0,25$ ). Для визначення довжини ділянки, на якій необхідно встановлювати екранні заземлення, користуються формулою

$$L_e = \frac{2}{\alpha} \ln \left[ \frac{1 - 2 \cdot k}{\frac{E_{\max}}{E_{\min}} \cdot (1 - k + \theta) - \frac{2 \cdot \rho_r \cdot y}{\sqrt{l_e^2 + 4 \cdot y^2}}} \right]. \quad (11.56)$$

Розташовувати екранні заземлення рекомендовано відповідно до рекомендацій у табл. 11.11.

$$n_e = 1 + \frac{l_e}{\Delta l_e}. \quad (11.57)$$

Таблиця 11.11. Рекомендовані відстані між екранами  $\Delta l_e$  і між екранами до трубопроводів  $Y_E$  у залежності від діаметра трубопроводу

$D, \text{мм}$	377	529	720	820	1020	1220	142016
$\Delta l_e, \text{м}$	16	21	28	32	40	46	55
$Y_E, \text{м}$	4,5	6	8	9	11	13	15

Ефективність роботи катодних установок з екранними заземленнями суттєво залежить від опору розтіканню з екранних заземлень. При надмірному збільшенні опору ланцюга екрана не досягається потрібного зниження різниці потенціалів «труба – ґрунт», надмірне зменшення опору призводить до підвищеної витрати електроенергії, а іноді і до зменшення довжини захисної зони. Необхідна величина опору ланцюга «екран – трубопровід» визначається за формулою

$$R_{це} = \frac{\rho_{\Gamma}}{2\pi l_e (E'_{max} - E_{max} - kz l_{др})} \left[ \frac{l_e \cdot E'_{max}}{y} + \frac{2l'_e E'_{max} - E_{max}}{\Delta l_e} \cdot \left( 0,557 + \ln \frac{n_e - 1}{2} + \frac{1}{n_e - 1} \right) - 2 \cdot (n_e - 1) \cdot (E'_{max} - E_{max}) \right]. \quad (11.58)$$

Знаючи величину  $R_{це}$ , проектують забезпечуючи його конструкцію екранного заземлення з урахуванням опору одиничного електрода, його розмірів і ефекту екранування. Сила струму катодної установки з екранним заземленням визначається за формулою

$$I_{др} = \frac{E'_{max}}{z \cdot (1 - k + \theta)}. \quad (11.59)$$

Сумарна сила струму екранних заземлень визначається за виразом

$$I_e = \frac{1}{R_{ца}} \left[ E_{max}(n_e - 1) + n_e E'_{max} - \frac{\Delta l_e (E'_{max} - E_{max})(n_e^2 - 1)}{2l_e} \right]. \quad (11.60)$$

Знаючи величини  $I_{др}$  і  $I_e$ , уточнюють значення коефіцієнта  $k = \frac{I_{др}}{I_e}$ . якщо розходження раніше прийнятого і розрахункового  $k$  перевищує 20%, то розрахунок параметрів катодної установки з екранними заземленнями необхідно повторити, задавши другу величину коефіцієнта  $k$ .

### Задача 15

При роботі СКЗ, що обслуговує трубопровід діаметром  $D=377$  мм з вхідним опором  $z=0,08$  Ом і константою розподілу  $\alpha = 1,86 \cdot 10^{-4}$  І/м, забезпечуючи зону захисту довжиною 12,1 км. За місцевими умовами необхідно забезпечити захист ділянки трубопроводу довжиною  $l' = 15$  км. Визначити параметри катодної установки з екранним заземленням, якщо  $\rho_{\Gamma} = 20$  Ом · м,  $Y = 500$  м,  $E_{max} = 0,55$  В,  $E_{min} = 0,3$  В.

### Розв'язання

1. Знаходимо

$$\theta = \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,08 \cdot 500} = 0,08$$

2. При  $k = 0,25$ , за формулою (11.55) знаходимо

$$E'_{max} = \frac{0,5 \cdot 0,3 \exp^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^5}{2}}}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1-0,25}{0,08}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot 500}{15 \cdot 10^3} \cdot \exp^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^5}{2}} - \frac{0,025}{0,08} - 1 \right]} = 0,96 \text{ В.}$$

3. Сила струму катодної установки за формулою (11.59)

$$I_{др} = \frac{0,96}{0,08 \cdot (1 - 0,25 + 0,08)} = 14,46 \text{ А.}$$

4. За таблицею 11.12 знаходимо віддалення екрану від трубопроводу і відстань між екранними заземленнями

$$Y = 4,5 \text{ м; } \Delta l_e = 16 \text{ м.}$$

5. Довжина ділянки трубопроводу, на якій необхідно встановити екранні заземлення, визначається з рівняння (56) методом послідовних наближень.

6. Приймаємо  $l_e = 1600 \text{ м}$  за формулою (56):

$$L_e = \frac{2}{1,86 \cdot 10^{-4}} \ln \left[ \frac{1 - 2 \cdot 0,25}{\frac{0,55}{0,96} \cdot (1 - 0,25 + 0,08) - \frac{2 \cdot 20 \cdot 500}{\sqrt{1600^2 + 4 \cdot 500^2}}} \right] = 1480 \text{ м.} \quad (11.56)$$

Приймаємо  $L_e = 1500 \text{ м}$ . Тоді

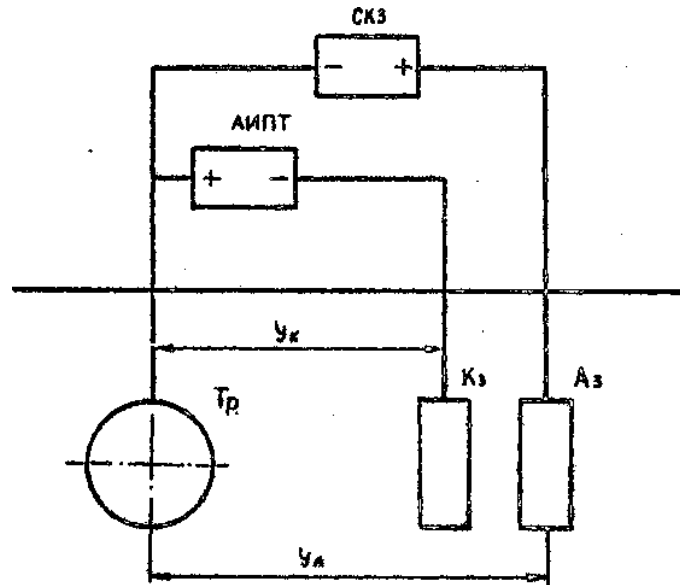


Рис. 11.8. Схема катодної установки з протипотенціалом: Тр – трубопровід, Кз – катодне заземлення, Аз – анодне заземлення; АИПТ – автономне джерело постійного струму; СКЗ – станція катодного захисту

$$l_e = \frac{2}{1,86 \times 10^{-4}} \ln \frac{1 - 2 \times 0,25}{\frac{0,55}{0,96} (1 - 0,25 + 0,08) - \frac{2 \times 20 \times 500}{\sqrt{1500^2 + 4 \times 500^2}}} = 1560 \text{ м.}$$

Оскільки розрахована величина  $l_e$  практично рівна заданій, в подальшому будемо вважати  $l_e = 1560 \text{ м.}$

6. Число екранних заземлень по формулі (57)

$$n_3 = 1 + \frac{1560}{16} = 97$$

7. Необхідна величина опору ланцюга екранного заземлення по формулі (11.58).

$$R_{\text{ле}} = \frac{20}{2 \times 3,14 \times 1560 \times (0,96 - 0,55 - 0,25 \times 0,08 \times 14,4)} \times \left[ \frac{1560 \times 0,96}{4,5} + \frac{2 \times 1560 \times 1,51}{16} \times (0,577 + \ln \frac{97 - 1}{2} + \frac{1}{97 - 1}) - 2(97 - 1)(0,96 - 0,55) \right] = 29,3 \text{ Ом.}$$

8. Сумарна сила струму екранних заземлень по формулі (11.67).

$$I_e = \frac{1}{29,3} \left[ 0,55(97 - 1) + 97 \times 0,96 - \frac{16(0,96 - 0,55)(97^2 - 1)}{2 \times 1560} \right] = 4,25 \text{ А.}$$

9. Розрахункова величина коефіцієнту К, складає:

$$K = \frac{4,25}{14,4} = 0,295$$

10. Розбіжність розрахункової та прийнятої в розрахунках величин, складає

$$\frac{0,295 - 0,25}{0,25} \times 100 = 18 \% < 20 \%$$

Тому повторний розрахунок проводити не варто. Решта параметрів установки визначається, як для звичайної СКЗ.

#### 11.4.2. Катодні установки з протипотенціалом

На відміну від звичайної СКЗ катодна установка з протипотенціалом має додаткові катодні заземлення з автономним джерелом постійного струму (рис. 11.8) [20-23].

Ефект застосування катодних заземлень такий же, як і екранних заземлень. Їх встановлюють в районі точки дренажу на відстані 20–40 м від трубопроводу з будь-якої сторони. При цьому мінус додаткових джерел струму підключається до катодного заземлення, плюс – до трубопроводу,

Розподіл прикладеної різниці потенціалів уздовж трубопроводу при роботі СКЗ з протипотенціалом описується рівнянням.

$$E(x) = a \times e^{-dx} + \frac{B}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{C}{\sqrt{x^2 + y_k^2}} \quad (11.61)$$

де а, В, С – коефіцієнти рівні:

$$a = E_{\max a} \left( \frac{1}{\theta_a} - \frac{1}{\theta_k} \right) + \frac{E_{\min}}{\theta}$$

$$B = y E_{\max a} \times \frac{\theta}{\theta_a}$$

$$C = y \frac{\theta}{\theta_k} (E_{\max a} - E_{\min}) \quad (11.62)$$

$E_{\max a}$  – величина прикладеної різниці потенціалів в точці дренажа, за якої забезпечується захист ділянки трубопроводу довжиною  $l$ .

$$E_{\max} = E_{\min} \frac{\theta_k e^{\frac{dl}{2}} - 1}{\theta_a K_B - 1} \quad (11.63)$$

де  $\theta_a, \theta_k$  – коефіцієнти, рівні:

$$\theta_a = 1 + B; \quad \theta_k = 1 + \frac{y}{y_k} B \quad (11.64)$$

$y_k$  – відстань катодного заземлення від трубопроводу.

Крива розподілення сумарної різниці прикладених потенціалів “трубопровід – ґрунт” вздовж трубопроводу має явно виражений максимум біля точки дренажу. Цей максимум не повинен перевищувати значення  $E_{\max}$  яке регламентується ДСТУ 9.015.74. Виконання умови  $E_x \leq E_{\max}$  досягають зміною величини  $y_k$ .

Відстань  $X$  від точки дренажу до перетину, в якому сумарна прикладена різниця потенціалів досягає максимуму, визначається методом послідовних наближень з рівняння

$$A = f(x),$$

$$\text{де } f(x) = \frac{1}{x} \ln \frac{A \times a}{x [c(x^2 + y_k^2)^{-1.5} - B(x^2 + y^2)^{-1.5}]} \quad (11.65)$$

Сила струму катодної установки визначається по залежності

$$I_{\text{др а}} = \frac{E_{\max a}}{Z(1+\theta)}, \quad (11.66)$$

Напруга на контактах СКЗ

$$\Delta E_a = I_{\text{др а}} (R_{\text{пр}} + R_a) + |E_{\max a} - E_A(l)|, \quad (11.67)$$

де  $E_A(l)$  – прикладена різниця потенціалів на відстані  $l$  від точки дренажу, де підтримується потенціал  $E_{\max a}$  у випадках, коли протипотенціал не створюється. Протипотенціал, який створюється в точці дренажу автономним джерелом струму, визначають за формулою

$$E_{\min k} = \frac{E_{\max a} - E_{\min}}{\theta_k} e^{\frac{dl}{2}}, \quad (11.68)$$

Сила струму автономного джерела

$$I_{\text{др к}} = \frac{E_{\max a} - E_{\min}}{Z(1 + \theta_k)}, \quad (11.69)$$

Напруга на його контактах

$$\Delta E_k = I_{\text{др к}}(R_{\text{пр к}} + R_k) + |E_{\min k} - E_k(l)|, \quad (11.70)$$

де  $R_{\text{пр к}}, R_k$  – опір відповідно дрітів катодної установки та ростікання струму з катодного заземлення;  $E_k(l)$  – прикладена різниця потенціалів, яку створило автономне джерело постійного струму на відстані  $l$ , якщо було б ввімкнене лише воно.

Знаючи величини  $I_{\text{др а}}, I_{\text{др к}}, \Delta E_a, \Delta E_k$ , за формулою (11.42) можна визначити потужність необхідну для живлення СКЗ та автономного джерела постійного струму.

### Задача 16

Для умов прикладу 14 визначити параметри катодної установки з протипотенціалом.

### Розв'язання

1. Прийmemo  $y_k = 25$  м.
2. Визначаємо коефіцієнти  $\theta_a$  та  $\theta_k$  за формулою (11.64):

$$\theta_a = 1 + 0,08 = 1,08;$$

$$\theta_k = 1 + \frac{500}{25} \times 0,08 = 2,6.$$

3. Коефіцієнт, який враховує вплив суміжної СКЗ за формулою (11.29),

$$K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,55}\right)^2 \times (1 + 0,08)}} = 0,55.$$

4. Прикладена різниця потенціалів в точці дренажу для захисту ділянки трубопроводу довжиною 15 км за формулою (11.70)

$$E_{\max a} = 0,3 \frac{2,6 \times e^{\frac{1,86 \times 10^{-4} \times 15 \times 10^3}{2}} - 1}{\frac{2,6}{1,08 \times 0,55} - 1} = 0,84 \text{ В.}$$

5. Прикладена різниця потенціалів автономного джерела струму в точці дренажу за формулою (11.68)

$$E_{\min k} = \frac{0,84 - 0,3}{2,6} e^{\frac{1,86 \times 10^{-4} \times 15 \times 10^3}{2}} = 0,051 \text{ В}$$

6. Коефіцієнти, що входять в рівняння (11.61), за формулою (11.62)

$$a = 0,84 \times \left( \frac{1}{1,08} - \frac{1}{2,6} \right) + \frac{0,3}{2,6} = 0,57;$$

$$B = 500 \times 0,84 \times \frac{0,08}{1,08} = 31,11;$$

$$C = 500 \frac{0,08}{2,6} (0,84 - 0,3) = 8,31;$$

7. Задаючи  $X = 200$  м., визначаємо величину правої частини рівняння (11.65):

$$f(x) = \frac{1}{200} \ln \frac{0,57 \times 1,86 \times 10^{-4}}{200 [8,31(200^2 + 2,5^2)^{-1,5} - 31,11(200^2 + 500^2)^{-1,5}]} = -2,2 \times 10^{-3};$$

Даний розрахунок повторюємо ще для декількох величин.

Результати розрахунків представимо таблицею.

X, мм	200	210	220	230	240
Право частина	$-2,2 \times 10^{-3}$	$-1,4 \times 10^{-3}$	$-0,8 \times 10^{-3}$	$-0,2 \times 10^{-3}$	$0,3 \times 10^{-3}$

За результатами розрахунків будемо графік залежності  $f(x)$  від  $X$  та визначаємо абсцису точки перетину цієї кривої з прямою  $f(x) = A = 1,86 \times 10^{-4}$  (рис. 11.9). Їй відповідає переріз  $X=237,5$  м. від точки дренажу.

8. Максимальна величина сумарної прикладеної різниці потенціалів “трубопровід–грунт” при  $X=237,5$  м за формулою (11.61) складає



$$E(x) = 0,57 \times e^{-1,86 \times 10^{-4} \times 237,5} + \frac{31,11}{\sqrt{500^2 + 237,5^2}} - \frac{8,31}{\sqrt{25^2 + 237,5^2}}$$

$$= 0,57 \text{ В.}$$

Розраховане значення трохи перевищує максимально допустиме значення  $E_{max} = 0,55 \text{ В}$ . Тому відстань катодного заземлення від трубопроводу потрібно збільшити.

Приймаємо  $y_k = 30 \text{ м}$ .

$$1. \theta_a = 1 + 0,08 = 1,08;$$

$$2. \theta_k = 1 + \frac{500}{30} \times 0,08 = 2,33.$$

$$3. K_B = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,55}\right)^2 \times (1 + 0,08)}} = 0,55.$$

$$4. E_{max a} = 0,3 \frac{2,33 \times e^{\frac{1,86 \times 10^{-4} \times 15 \times 10^3}{2}} - 1}{\frac{2,6}{1,08 \times 0,55} - 1} = 0,86 \text{ В.}$$

$$5. E_{min k} = \frac{0,84 - 0,3}{2,33} e^{\frac{1,86 \times 10^{-4} \times 15 \times 10^3}{2}} = 0,06 \text{ В}$$

$$6. a = 0,86 \times \left( \frac{1}{1,08} - \frac{1}{2,33} \right) + \frac{0,3}{2,33} = 0,56;$$

$$B = 500 \times 0,86 \times \frac{0,08}{1,08} = 31,85;$$

$$C = 500 \frac{0,08}{2,33} (0,86 - 0,3) = 9,61.$$

7.

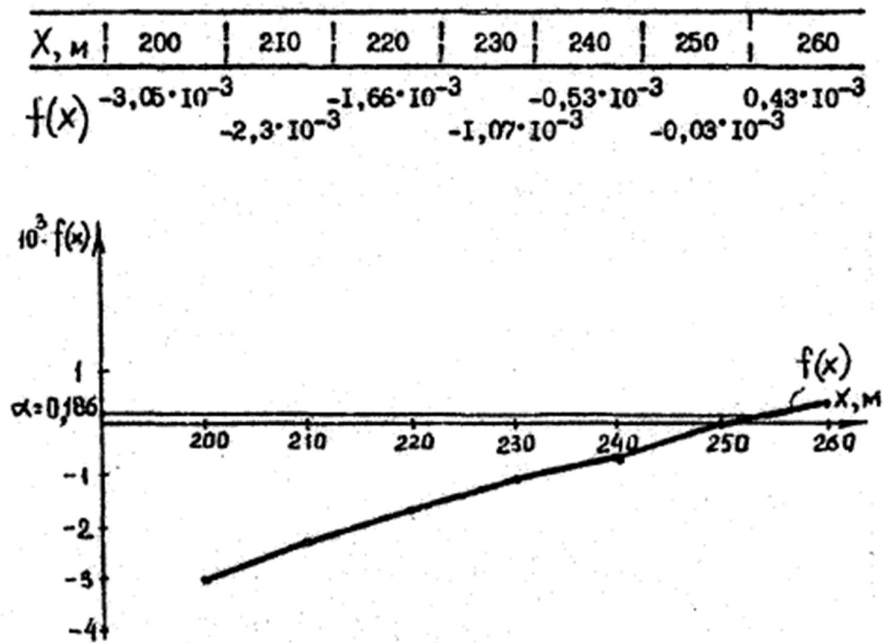


Рис. 11.9.

$$8. E(x)_{x=251,5} = 0,56 \cdot e^{-1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 251,5} + \frac{31,85}{\sqrt{500^2 + 251,5^2}} - \frac{9,61}{\sqrt{500^2 + 25,5^2}} = 0,553$$

9. Сила струму СКЗ

$$I_{\text{дрa}} = \frac{0,86}{0,08 \cdot (1 + 0,08)} = 9,96 \text{ A.}$$

10. Сила струму автономного джерела створення протипотенціалу

$$I_{\text{дрк}} = \frac{0,86 - 0,3}{0,08 \cdot (1 + 2,33)} = 3,01 \text{ A.}$$

## 11.5. Спільний катодний захист підземних металевих споруд

### 11.5.1. Паралельно вкладені трубопроводи

У випадку паралельної укладки декількох трубопроводів на невеликій відстані один від одного доцільно здійснювати їх спільний захист, тобто захист всіх паралельно укладених трубопроводів на даній ділянці однієї СКЗ [20-23].

При спільному захисті паралельно укладених трубопроводів їх умовно замінюють одним трубопроводом з еквівалентними параметрами,

що дозволяє виконувати всі розрахунки за формулами п.п. 11.2–11.3. Еквівалентні параметри розраховуються по наступним залежностям:

поздовжній опір

$$R_{TE} = \frac{\sum_{i=1}^2 R_{Ti}}{\sum_{i=1}^2 R_{Ti}} ; \quad (11.71)$$

опір ізоляційного покриття на одиницю довжини трубопроводу

$$R_{I3e} = \frac{\sum_{i=1}^2 R_{I3i} - R_{Bi-2}^2}{\sum_{i=1}^2 R_{I3i} - 2 \cdot R_{Bi-2}} ; \quad (11.72)$$

стала розподілу струму та потенціалу

$$\alpha_e = \sqrt{\frac{R_{TE}}{R_{I3e}}} , \quad (11.73)$$

де  $R_{TE}$ ,  $R_{I3e}$  – поздовжній опір ізоляційного покриття L-го трубопроводу;  $R_{Bi}$  – взаємний опір між двома розглянутими трубопроводами,

$$R_{Bi} = \frac{\rho_r}{\pi} \cdot \ln \frac{1}{B \sqrt{\sum_{i=1}^2 \alpha_i}} ; \quad (11.74)$$

$\alpha_1$  – стала розподілу i-го трубопроводу;  $B$  – відстань між трубопроводами. Якщо число паралельно укладених трубопроводів більше двох, то розрахунок еквівалентних параметрів необхідно виконувати по формулам (11.71) – (11.72), замінивши спочатку два трубопроводи одним, а потім еквівалентний та третій трубопровід знову замінити одним еквівалентним і т.д. Для зрівнювання довжини захисних зон на трубопроводах, об'єднаних спільним катодним захистом, окрім перемички, встановленої в точці дренажу, споруджують додаткові перемички на межах спільних захисних зон. Переріз перемички обирають з умови, що падіння напруги на кожній з них не має перевищувати 0,02 В. Проте згідно з умовами механічної міцності площа перерізу перемички має бути не меншою ніж 25 мм<sup>2</sup>.

### Задача 17

Розрахувати вхідний опір та сталу розподілу струму та потенціалу вздовж системи паралельно укладених трубопроводів, котрі мають однаковий стан ізоляційного покриття. ( $R_{\Pi} = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ ) та наступний діаметр  $D$  і товщину стінки  $\delta$ :

1-й трубопровід:  $D_1 = 1020 \text{ мм}$ ;  $\delta_1 = 10 \text{ мм}$ ;

1-й трубопровід:  $D_1 = 720 \text{ мм}$ ;  $\delta_1 = 9 \text{ мм}$ ;

1-й трубопровід:  $D_1 = 529 \text{ мм}$ ;  $\delta_1 = 8 \text{ мм}$ ;

Трубопроводи вкладені в ґрунт з середнім питомим електроопором  $\rho_{\Gamma} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  на відстані  $B = 10 \text{ м}$  один від одного.

### Розв'язання

1. За формулою (2) знаходимо поздовжній опір одиниці трубопроводів

$$R_{T1} \frac{0,245}{3,14(1020 - 10) \cdot 10} = 9,63 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

Аналогічно знаходимо:

$$R_{T2} = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м та}$$

$$R_{T3} = 18,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

2. Еквівалентний поздовжній опір 1-го та 2-го трубопроводів по формулі (11.71)

$$R_{TE1-2} = \frac{9,63 \cdot 10^{-6} \cdot 12,2 \cdot 10^{-6}}{9,63 \cdot 10^{-6} + 12,2 \cdot 10^{-6}} = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

3. Еквівалентний поздовжній опір всіх трубопроводів

$$R_{TE1-2-3} = \frac{5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 18,7 \cdot 10^{-6}}{5,3 \cdot 10^{-6} + 18,7 \cdot 10^{-6}} = 4,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$$

4. Опір ізоляції на одиниці довжини для кожного трубопроводу за формулою (11.10):

$$R_{I3_1} = \frac{1000}{3,14 \cdot 1,02} = 313 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Аналогічно знаходимо:

$$R_{I3_2} = 442 \text{ Ом} \cdot \text{м та}$$

$$R_{I3_3} = 600 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

5. Стала розподілу струму та потенціалу для кожного трубопроводу за формулою (11.13):

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{9,63 \cdot 10^{-6}}{313}} = 1,75 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}$$

Аналогічно знаходимо:

$$\alpha_2 = 1,66 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}} \text{ та}$$

$$\alpha_3 = 1,77 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}$$

6. Взаємний опір між 1–м та 2–м трубопроводами за формулою (11.74):

$$R_{B1-2} = \frac{20}{3,14} \ln \frac{1}{10\sqrt{1,75 \cdot 10^{-4} \cdot 1,66 \cdot 10^{-4}}} = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

7. Еквівалентний опір ізоляційного покриття на одиниці довжини 1–го та 2–го трубопроводів за формулою (11.72)

$$R_{I3_{1-2}} = \frac{313 \cdot 442 - 40^2}{313 + 442 - 2 \cdot 40} = 181 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

8. Стала розподілу струму та потенціалу трубопроводу, еквівалентного 1–му та 2–му трубопроводу, за формулою (11.73):

$$\alpha_{e_{1-2}} = \sqrt{\frac{5,3 \cdot 10^{-6}}{181}} = 181 \frac{1}{\text{м}}$$

9. Взаємний опір між еквівалентним трубопроводом (котрий замінює 1–й та 2–ий) та третім трубопроводом:

$$R_{B1-2-3} = \frac{20}{3,14} \ln \frac{1}{10\sqrt{1,71 \cdot 10^{-4} \cdot 1,77 \cdot 10^{-4}}} = 40,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

10. Еквівалентний опір ізоляційного покриття на одиниці довжини всіх трьох трубопроводів

$$R_{I3_{1-2-3}} = \frac{181 \cdot 600 - 40,1^2}{181 + 600 - 2 \cdot 40,1} = 129 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

11. Стала розподілу струму та потенціалу (загальна для системи трубопроводів)

$$\alpha_{e_{1-2-3}} = \sqrt{\frac{4,13 \cdot 10^{-6}}{129}} = 1,79 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{м}}$$

12. Вхідний опір системи нафтопроводів за формулою (11.11)

$$z_{e_{1-2-3}} = 0,5 \sqrt{4,13 \cdot 10^{-6} \cdot 129} = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$$

#### **11.5.2. Розгалуження комунікації перекачувальних станцій та нафтобаз**

При розрахунку катодного захисту трубопроводу нафтобаз, нафтоперекачувальних, компресорних та газорозподільних станцій необхідно враховувати, що вони з'єднуються із заземленими об'єктами (резервуари, ємності, труби котелень, контури блискавкозахисту, захисні та робочі заземлення). Струм СКЗ від анодного заземлення направляється в основному в потужні контури заземлення, і лише незначна їх частина попадає безпосередньо в трубопровід. В цьому випадку силу дренажного струму варто визначати за формулою [20-23]:

$$I_{\text{др}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{R_3 \cdot E_{\text{зах min}}}{\rho_r}, \quad (11.75)$$

де  $K_1, K_2$  – коефіцієнти, які залежать від кількості контурів заземлення та стану ізоляції труб;  $R_3$  – радіус захисної зони.

Таблиця 12. Величина коефіцієнтів  $K_1$  та  $K_2$ 

Кількість контурів заземлення	$K_1$	Перехідний опір ізоляційного покриття труби, Ом·м <sup>2</sup>	$K_2$
1	2	3	4
1	1	50	10
2	1,5	80	6
3	2	100	4
4	2,5	500	2,5
5	3	1000	2
6	3,5	2000	1,5
7	4	4000	1,2
8	5	5000	1,0
9	7	8000	0,8
10	10	10000	0,5

Необхідну для забезпечення захисту напруги на контактах СКЗ визначають за формулою

$$\Delta E = \frac{2 \cdot I_{др}}{K_1} (R_a + R_{пр}). \quad (11.76)$$

### Задача 18

Визначити параметри СКЗ для захисту мережі підземних трубопроводів нафтобази в радіусі  $R_z = 300$  м. Кількість приєднаних до них контурів заземлення 2, перехідний опір ізоляції трубопроводів  $R_{п} = 700$  Ом·м<sup>2</sup>. Інші необхідні данні:  $R_a = 10$  Ом;  $R_{пр} = 0,5$  Ом;  $\rho_r = 30$  Ом·м.

### Розв'язання

1. По табл.12 знаходимо величину коефіцієнтів  $K_1$  та  $K_2$ . Згідно умов прикладу  $K_1 = 1,5$ . Величину коефіцієнту  $K_2$  знаходимо методом інтерполяції:

$$K_2 = 0,8 + (8000 - 7000) \cdot \frac{1,0 - 0,8}{8000 - 5000} = 0,87$$

2. Визначаємо силу дренажного струму за формулою (11.75)

$$I_{\text{др}} = 1,5 \cdot 0,87 \cdot \frac{300 \cdot 0,85}{30} = 11,1 \text{ А.}$$

3. Знаходимо напругу на контактах СКЗ за формулою (11.76)

$$\Delta E = \frac{2 \cdot 11,1}{1,5} (10 + 0,5) = 155,4 \text{ В.}$$

4. Необхідна потужність СКЗ для забезпечення захисту за формулою (11.42)

$$p = 11,1 \cdot 155,4 = 1724,9 \text{ Вт.}$$



**Перелік контрольних питань з дисципліни «Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування»**

1. Яка існує класифікація методів захисту металів від корозії?
2. Які критерії та рекомендації по вибору сумісних пар металів?
3. Який вплив геометричних форм на процес корозії у різних середовищах, спорудах, конструкціях, системах трубопроводів, резервуарах?
4. Як необхідно враховувати геометрію поверхні при проектуванні для зменшення процесів корозії?
5. Яка сутність та завдання корозійного моніторингу?
6. Які методи визначення швидкості корозії?
7. Яке існує обладнання корозійного моніторингу? Які правила його монтажу та обслуговування?
8. Що таке пасивний захист металів? Які вимоги висувають до захисних покриттів?
9. Що таке пасивація металів? Які існують методи переведення металу в пасивний стан?
10. Які теоретичні основи катодного захисту металів?
11. Які умови ефективного застосування катодного захисту металів? Як обґрунтовується величина захисного потенціалу для реальних умов експлуатації трубопроводів?
12. Які є технічні засоби катодного захисту? Яку будову має схема станції катодного захисту?
13. Яка будова та схема електродів порівняння?
14. Що таке протекторний захист металів? Які області застосування протекторного захисту? Які основні характеристики протекторних металів?

15. Які існують конструкції протекторів? Які існують активатори для протекторів і яке їх призначення?
16. Який вплив блукаючих струмів на підземні споруди? Які є методи визначення присутності блукаючих струмів в ґрунті?
17. Які технічні засоби захисту від блукаючих струмів? Які вимоги до дренажу блукаючих струмів на їх джерело та способи підключення дренажу?
18. Які теоретичні аспекти анодного захисту?
19. Який вплив механічних навантажень на корозійні процеси у спорудах, обладнанні, системах трубопроводів та виробках?
20. Що таке корозійне розтріскування: визначення, умови протікання, механізм, методи захисту?
21. Що таке корозійна втома: визначення, умови протікання, механізм, методи захисту?
22. Що таке наводнювання металів: визначення, умови протікання, механізм, методи захисту?
23. Що таке фретінг корозія: визначення, умови протікання, механізм, методи захисту?
24. Що таке кавітаційне руйнування: визначення, умови протікання, механізм, методи захисту?
25. Який вплив стану поверхні металевих виробів на процес корозії? Які види обробки поверхні металевих виробів?
26. Що таке комбінований захист металів? Які області використання різних комбінацій методів захисту?
27. Які вимоги до антикорозійного обслуговування об'єкта?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Улиг Г. Г., Рєви Р. У. Коррозия и борьба с ней. / Г. Г.Улиг, Р. У. Рєви – Л.:Химия, 1989. – 456 с.
2. Стрижевский И. В., Сурис М. А. / И. В.Стрижевский, М. А. Сурис Защита подземных теплопроводов от коррозии.–М.:Энергоатомиздат, 1983. – 344 с.
3. Никольский К. К. Коррозия и защита от нее подземных металлических сооружений связи / К. К. Никольский–М.:Радио и связь, 1984. – 208 с.
4. Кузуб В. С. Анодная защита технологического оборудования / В. С. Кузуб–М.:Металлургия, 1989.– 96 с.
5. ОАО "Концерн-Энергомера". ДАТЧИК СКОРОСТИ КОРРОЗИИ ДСК РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ РМЕА.416600.403 РЭ [Электронный ресурс] / ОАО "Концерн-Энергомера". – 2005. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.docme.ru/doc/310214/dsk---e-nergomera>.
6. Retractable Linear Polarization Resistance (LPR) Probe [Электронныйресурс] – Режимдоступудоресурсу: <http://www.caproco.com/catalog/pdf/Probes-Instruments/Linear-Polarization-Resistance/Low-Pressure-Retractable/Retractable-LPR-2-or-3-Element.pdf>.
7. Cormon Intrusive Measurement Probes [Электронныйресурс] – Режимдоступудоресурсу: [http://www.teledyneoilandgas.com/\\_document/TDY\\_317\\_IntrusiveMeasure\\_IFS321931\\_RevC\\_1.pdf](http://www.teledyneoilandgas.com/_document/TDY_317_IntrusiveMeasure_IFS321931_RevC_1.pdf).
8. Linear Polarization Resistance Probe Model LP1000 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.alspi.com/lp1000.pdf>.
9. Cormon Data Transmitters and Receivers [Электронныйресурс] – Режимдоступудоресурсу:[http://www.teledyneoilandgas.com/\\_document/TDY\\_317\\_DataTransmitter\\_IFS344988\\_RevB\\_1.pdf](http://www.teledyneoilandgas.com/_document/TDY_317_DataTransmitter_IFS344988_RevB_1.pdf).

10. MS1000 Corrosion Meter [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.alspi.com/manuals/ms1000manual.pdf>.
11. Плудек В. В. Защита от коррозии на стадии проектирования / В. В. Плудек–М.: Мир, 1980.–438 с.
12. Коррозия. Справочное издание /под ред. Л. Л. Шраера– М.: Металлургия, 1981.–632 с.
13. Зрунек М. Противокоррозионная защита металлических конструкций /М. Зрунек– М.: Машиностроение, 1984.–136 с.
14. Мудрук А. С., Гончаренко П. В. Коррозия й вопросы конструирования / А. С.Мудрук, П. В. Гончаренко–К. : Техніка, 1982.–135 с.
15. Антропов Л. И., Макушин Е. М., Панасенко В. Ф. Ингибиторы коррозии металлов / Л. И.Антропов, Е. М.Макушин, В. Ф. Панасенко–К. : Техніка, 1981.–183 с.
16. Техника борьбы с коррозией. Пер. с польск. / под ред. А. М.Сухотина – Л.:Химия, 1980.–224 с.
17. Новицкий В. С., Писчик Л. М. Коррозионный контроль технологического оборудования /В. С.Новицкий, Л. М. Писчик– К.: Наукова думка, 2001.–171 с.
18. Голего Н. Л., Алябьев А. Я., Шевеля В. В. Фреттинг–коррозия металлов / Н. Л.Голего, А. Я.Алябьев, В. В. Шевеля – К.: Техніка, 1974.–272 с.
19. Антропов Л. І. Теоретична електрохімія: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / Л. І. Антропов – К.: Либідь, 1993.–544 с.
20. Прикладная электрохимия / под ред. А. П.Томилова. – М.: Химия, 1984.–520 с.
21. Саакян Л. С., Ефремов А. П. Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии / Л. С.Саакян, А. П. Ефремов– М.: Недра, 1982.– 227 с.
22. Обследование и защита от коррозии химического оборудования

- /Л. Н.Кузюков, В. А. Борисенко, Л. В. Березовский й др. – К.: Техніка, 1982.– 104 с.
- 23.Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии / под ред. И. В. Семеновой – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
- 24.Защита от коррозии старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник: в 2 томах.– под ред. А. А. Герасименко– М.:Машиностроение, 1987, 1 т. 668 с., 2 т. 784 с.
- 25.Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии:Справочник–М.: Металлургия, 1984. – 495 с.
- 26.Туфанов Д. Т. Коррозионная стойкость нержавеющей сталей, сплавов и чистых металлов / Д. Т. Туфанов–М.:Металлургия, 1990. – 320 с.
- 27.Бибиков Н. Н., Люблинский Е. Я., Поварова Л. В. Электрохимическая защита морских судов от коррозии / Н. Н.Бибиков, Е. Я. Люблинский, Л. В. Поварова–Л.:Судостроение, 1999. – 261с.
- 28.Морская коррозия / под ред. М. Шумахера– М.: Металлургия 1983. – 512 с.
- 29.Герасименко А. А. Защита машин от биоповреждений / А. А.Герасименко–М.: Машиностроение, 1984.– 112 с.
- 30.Структура и коррозия металлов и сплавов: Атлас. под ред. Е. А. Ульянина. Справочник –М.:Металлургия, 1989.– 400 с.
- 31.Wagner C., TraudW. Über die Deutung von Korrosionsvorgängen durch Überlagerung von elektrochemischen Teilvorgängen und über die Potentialbildung an Mischelektroden / C. Wagner, W. Traud // Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie. – 1938. – Vol. 44, Is. 7. – p. 391–402.

32. Stern M. Electrochemical polarization: I. A. theoretical analysis of the shape of polarization curves / M. Stern, A. L. Geary // J. Electrochem. Soc. – 1957. – Vol. 104, No 1. P. 56–63.
33. Мансфелд Ф. Определение тока коррозии методом поляризационного сопротивления // Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее / под ред. М. Фонтана, Р. Стэйл. – М.: Металлургия, 1980. – Т. 6. – С. 259–265.
34. Антропов Л. И. Определение скорости коррозии и эффективности ингибиторов методом поляризационного сопротивления / Л. И. Антропов, М. А. Герасименко, Ю. С. Герасименко // Защита металлов. – 1966. – Т. 2, № 2. – С. 115–121.
35. Герасименко Ю. С. Нелинейность поляризационной кривой и точность определения поляризационного сопротивления / Ю. С. Герасименко // Защита металлов. – 1979. – Т. 15, № 6. – С. 673–677.
36. Герасименко Ю. С. Учет структуры двойного электрического слоя в методе поляризационного сопротивления / Ю. С. Герасименко // Защита металлов. – 1984. – Т. 20, № 6. – С. 898–907.
37. Kelly R. G. Electrochemical Techniques in Corrosion Science and Engineering / Robert G. Kelly, John R. Scully, David W. Shoesmith, Rudolph G. Buchheit. – N.-Y. : Marcel Dekker, 2003. – 436 p.
38. Чвірук В. П. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ / В. П. Чвірук, С. Г. Поляков, Ю. С. Герасименко. – К. : Академперіодика, 2007. – 324 с.
39. Като М. Модифицированный метод поляризационного сопротивления. Измерение поляризационного сопротивления из начальных переходных кривых при постоянном токе / М. Като, М. Кояма // Босеку гидзюцу. – 1985. – Т. 34, № 4 – С. 215–221.